

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martina Gawronová**  
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství 2109T033  
Studijní obor: Téma: Slévárenské technologie

### Lité kovové pěny s pravidelnou buňkovou strukturou Cast Cellular Metals with Regular Structure

Zásady pro vypracování:

1. Cíl práce
3. Analýza současného stavu výroby litých porézních kovů s pravidelnou strukturou
4. Experimentální ověření vybraných postupů, návrh vlastní metodiky
5. Diskuse dosažených výsledků
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Banhart, J. *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metals foams*. Progress in Materials Science, 46, 2001, pp. 539 - 632.
- [2] Dairon, J. et al. *Mousses métalliques: CTIF innove dans les matériaux cellulaires*. Fonderie - Fondateur d'aujourd'hui, No 295, 2009, pp. 12 - 19.
- [3] Gaillard, Y. et al. *Les mousses d'aluminium CTIF par voie de fonderie*. Fonderie - Fondateur d'aujourd'hui, No 250, 2005, pp. 13 - 24.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vlasta Bednářová, CSc.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Lichý, Ph.D.

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 22.04.2013



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.  
děkan fakulty

# **Zásady pro vypracování diplomové práce**

## **i.**

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

### Uspořádání diplomové práce:

- |                                              |                              |
|----------------------------------------------|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 5. Obsah DP                  |
| 2. Zásady pro vypracování DP                 | 6. Textová část DP           |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy                   |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za titulním listem. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje - horní, dolní - 2,5 cm, levý - 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře:                      *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
                                    *Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
                                    *Katedra.....*

uprostřed:                      *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole:                              *Rok*                                      *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

### IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2012/2013.

Ostrava 30. 11. 2012

**Prof. Ing. Eudovít Dobrovský, CSc, Dr.h.c.**  
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství VŠB-TU  
Ostrava

# PROHLÁŠENÍ


Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci Školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VSB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VSB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VSB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VSB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VSB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně**

V Ostravě

17.4.2013

  
.....  
podpis (jméno\*á příjmení

## **Poděkování**

Chtěla bych tímto poděkovat své vedoucí diplomové práce, doc. Ing. Vlastě Bednářové, CSc. z katedry Metalurgie a slévárenství VŠB-TU Ostrava, za příjemné vedení práce, profesionální přístup, ochotu, cenné rady a připomínky a převážně za velkou míru trpělivosti. Stejně poděkování patří také konzultantovi mé práce Ing. Petru Lichému, Ph.D.

Dále bych chtěla poděkovat všem nejen z katedry Metalurgie a slévárenství, kteří se byť nepřímo podíleli na řešení výroby kovových pěn, za jejich vřelý přístup, cenné rady a nápady a v neposlední řadě také Bc. Ivaně Kroupové za velmi motivující spolupráci.

Poděkování patří také mé rodině za vytvoření příjemného prostředí pro studium a velkou podporu.

## **Abstrakt**

Cílem mé diplomové práce je představit kovové pěny jako nový rozvíjející se typ materiálu s širokou oblastí využití především v moderním průmyslu. Teoretická část této práce se zaměřuje na popis různých slévárenských metod výroby kovových pěn a jejich současné využití. V praktické části se budeme podrobněji zabývat zdokonalováním již dříve vybraných a ověřených výrobních postupů pro pěny ze slitiny hliníku. Dále také aplikací těchto postupů na litinu a především výrobou pěn s pravidelnou buňkovou strukturou.

## **Klíčová slova**

Kovová pěna, pórovitý kovový materiál, hliníková pěna, výroba kovové pěny, litá buňková struktura, mřížová struktura.

## **Abstract**

The aim of my thesis is to introduce metal foams as a new emerging type of material with wide field of use, especially in modern industry. The theoretical part of this work focuses on the description of the various casting methods of manufacturing of metal foams and their current use. In the practical part we will deal in more detail previously selected and validated manufacturing processes for foams made of aluminum alloy. As well as the application of these procedures for cast iron and mainly manufacture foams with regular cellular structure.

## **Key words**

Metal foam, porous metal material, aluminium foam, manufacturing of metal foam, cast cellular structure, lattice block structure.

# Obsah

Úvod .....	3
1. Vlastnosti porézních kovových materiálů .....	5
2. Použití.....	6
2.1. Pěnový hliník .....	7
2.2. Absorpce nárazové energie .....	8
2.3. Tlumení vibrací a zvuku, tepelné izolace .....	9
2.4. Lehké konstrukce .....	11
2.5. Architektura a další využití.....	13
3. Metody výroby .....	14
3.1. Slévárenské metody .....	14
3.1.1. Vnášení plynu do taveniny .....	16
3.1.2. Nízkotlaké lití 3-D pěnových odlitků .....	18
3.1.3. Lití na odpařitelný model z polymerní pěny .....	20
3.1.4. Zalití výplňového materiálu - prekurzorů.....	23
3.1.5. Materiály s mřížovou strukturou .....	24
4. Praktické řešení .....	28
4.1. Lité kovové pěny s nepravidelnou buňkovou strukturou .....	29
4.1.1. Kovové filtry ze slitin hliníku .....	29
4.1.2. Použití prekurzorů jako výplňového materiálu .....	36
4.2. Lité kovové pěny s pravidelnou buňkovou strukturou .....	39
4.2.1. Materiály s mřížovou strukturou .....	39
4.2.1.1. Model .....	40
4.2.1.2. Volba jádrové směsi.....	41
4.2.1.3. Výroba jader .....	46
4.2.1.4. Formování .....	47
4.2.1.5. Vyhodnocení lití .....	49

4.2.1.6. Tlaková zkouška .....	51
4.2.2. Materiály s pravidelnými kulovitými buňkami .....	56
Závěr .....	59
Seznam použité literatury: .....	60



# Úvod

*Mnoho objevů je vyhrazeno nadcházejícím věkům. Svět by byl ubohý, pokud by neobsahoval námět ke zkoumání pro celý svět v každé době.*

Seneca

Přestože se v současné době používají porézní materiály převážně na izolační účely, výrobu filtrů a různých obalových materiálů, jen málokdo tuší, že se právě díky své poréznosti dají tyto materiály efektivně využít i ke konstrukčním účelům. Spíše naopak je obecně snahou všemožně zabránit výskytu pórů v materiálech, ze kterých se vyrábějí konstrukce přenášející velké mechanické zatížení [1]. Jsou to ale právě pěny a ostatní pórovité materiály s buňkovou strukturou, které jsou známé pro své mnohé zajímavé kombinace fyzikálních a mechanických vlastností, jako jsou vysoká tuhost konstrukce při její nízké hmotnosti nebo vysoká prodyšnost v kombinaci s vysokou tepelnou vodivostí [2].

Dnes se už běžně vyrábějí různé polymerní a keramické celulární materiály, které mají dobré tepelné a zvukoizolační vlastnosti a jsou schopny při své deformaci spotřebovat velké množství energie [1]. Zpěnit lze i spousta jiných materiálů, mimo jiné i obyčejné sklo [3]. Méně známé ale je, že i kovy a jejich slitiny mohou být vyrobeny jako buněčné materiály nebo pěny [2]. Pohled na strukturu kovové pěny uvádí obrázek 1.



**Obr. 1** Výroba pěnového hliníku METCOMB®: struktura pěnového hliníku [1].

Výraz *pěna* v původním slova smyslu je vyhrazen pro disperzi bublinek v kapalině. Morfologie pěny však může zůstat zachována, i když kapalina ztuhne, čímž získáváme to, čemu se říká *pevná pěna*. V podstatě, když mluvíme o *kovových pěnách*, mluvíme o pevných pěnách, jelikož kapalně kovové pěny jsou pouze mezistupeň v průběhu výroby tohoto materiálu. Pevné pěny s obvykle kulatými a od sebe navzájem izolovanými póry jsou pak zvláštní případ, kterému nejčastěji říkáme *celulární materiál* nebo také *porézní kovy*. Kovová fáze zde rozděluje prostor do uzavřených buněk oddělených tenkými filmy, které obsahují plynnou fázi. Na druhou stranu celulární pěny nemusí být nutně vyrobeny ztuhnutím původně kapalně fáze, aby získaly podobnou morfologii. Jako příklad můžeme uvést otevřenou strukturu slinutých prášků s propojenými dutinami. Často se takovéto porézní struktury také nazývají „pěny“ nebo vhodněji „houby“ [2, 4].

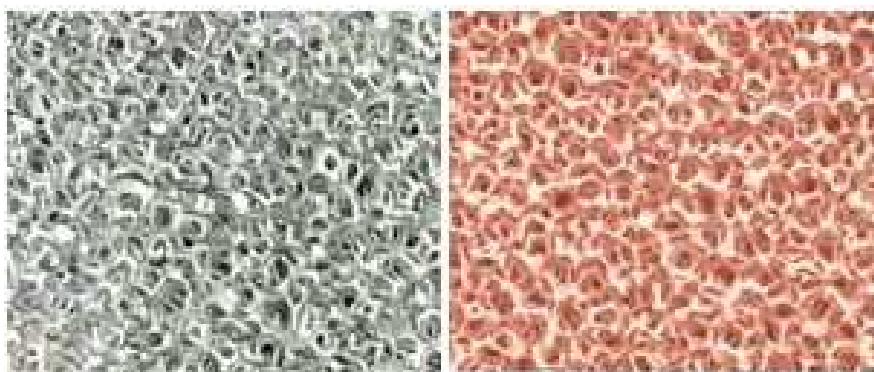
Cílem mé diplomové práce je představit kovové pěny a pórovité materiály jako moderní a perspektivní materiály, díky svým velmi zajímavým vlastnostem. Z důvodu moderního trendu odlehčení materiálů a celkových konstrukcí s důrazem na ekologii jsou kovové pěny a porézní kovové materiály stále častěji vyhledávanější alternativou za pevné konstrukční materiály.

Tato práce volně navazuje na diplomovou práci Ing. Iriny Zyryanové - Vaculíkové, která na Vysoké škole báňské započala zkoumání pórovitých kovových materiálů, jejich vlastností a ověřování jednotlivých technologií výroby.

Práce je rozdělena na dvě části, kde v teoretické části představuji kovové pěny a pórovité kovové materiály z hlediska jejich vlastností a zkráceně také možnostech využití. Největší a nejpodrobnější část je zde věnována především slévárenským metodám výroby kovových pěn a pórovitých kovových materiálů. Praktická část se bude naopak podrobně zabývat převážně výrobou kovových materiálů s pravidelnou buňkovou strukturou, zkoušením a ověřováním nejvhodnějších materiálů pro výrobu a jejich vlastností. Dále si zkráceně popíšeme pokračování již dříve ověřené metody výroby kovových pěnových filtrů ze slitin hliníku, jejichž metodou výroby se jako hlavním tématem podrobněji zabývá ve své diplomové práci Bc. Ivana Kroupová.

# 1. Vlastnosti porézních kovových materiálů

Nejperspektivnějšími v současnosti vyvíjenými vysoce porézními lehkými konstrukčními materiály jsou kovové pěny. Jsou to velmi složité systémy s ohledem na jejich makro a mikrostruktury [5]. Když mluvíme o kovových pěnách, mluvíme o materiálech s objemovým podílem plynových pórů, tzv. porezitě, v rozmezí 40 – 98 % [6]. V porovnání s polymerními pěnami je ovšem jejich tuhost řádově vyšší. Jsou také stabilnější i při vyšších teplotách, jsou nehořlavé a v ohni se z nich neuvolňují toxické plyny. Důležitým faktem je, že jsou oproti polymerům nebo keramice poměrně lehko recyklovatelné, tím pádem nemají žádný negativní dopad na čistotu životního prostředí [1]. Pěny mohou být vyráběny z mnoha běžně rozšířených kovů a jejich slitin, jako jsou Mg, Zn, Ti, Pb, Cu, Fe, Ni. Největší využití ale dnes nacházejí pěny z hliníku a jeho slitin. Strukturu pěn ze slitin hliníku a mědi ukazuje obrázek 1.1.



**Obr. 1.1** Ukázka struktury pěn s otevřenými póry firmy Duocel®. Vlevo: hliníková pěn. Vpravo: měděná pěn [7].

Vlastnosti kovových pěn nebo porézních kovových materiálů závisí na:

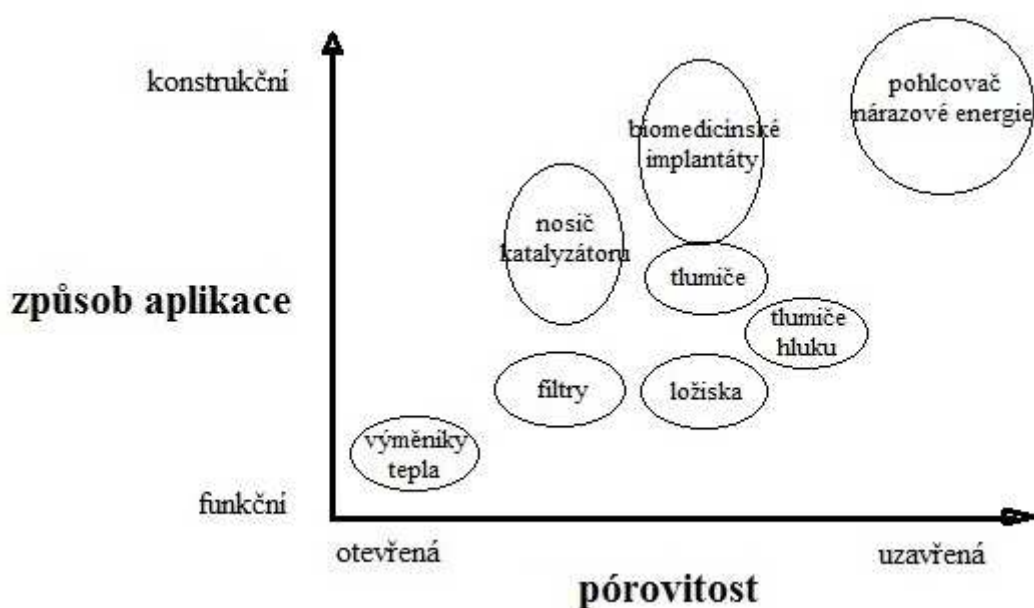
- a) *Morfologii*: typu pórovitosti (dělíme na otevřené nebo uzavřené póry), požadované porezity materiálu, velikosti a tvaru pórů a na celkové vnitřní ploše porézního materiálu.
- b) *Metalurgii*: na požadovaném kovu či slitině nebo mikrostruktuře.
- c) *Zpracování*: možnosti vytváření pěn nebo pravidelných buněčných materiálů nebo výrobě kompozitů mezi pěnami a plnými profily.
- d) *Ekonomice*: na otázce nákladů a vhodnosti pro velkosériovou výrobu [2].

Mechanické vlastnosti otevřených a uzavřených buněk pěn se výrazně liší. Lineární pružné reakce v pěnách s otevřenými buňkami vznikají prohnutím buněčných stěn. U pěn s uzavřenými buňkami se stěny buněk natahují, jelikož je v buňkách vlivem tlaku komprimován vzduch nebo jiný uzavřený plyn [8].

Morfologie buněk se také liší podle způsobu výroby pěny. Ve slévárenských slitinách jsou zpravidla póry menší, proti tvářeným slitinám, mají nepravidelný tvar, stěny pórů jsou velice tenké a struktura je značně nerovnoměrná. Pěny vyrobené z tvářených slitin mají naopak póry převážně kruhové a větší. Stěny pórů jsou většinou mnohem hrubší [1].

## 2. Použití

Pro různé aplikace z kovových pěn je velmi důležitá morfologie pórů, která ovlivňuje pevnost výsledného materiálu nebo např. jeho vhodnost k filtračnímu využití z důvodu propustnosti filtrovaného média. Příklady oblastí použití podle druhu pórů znázorňuje obrázek 2.1.



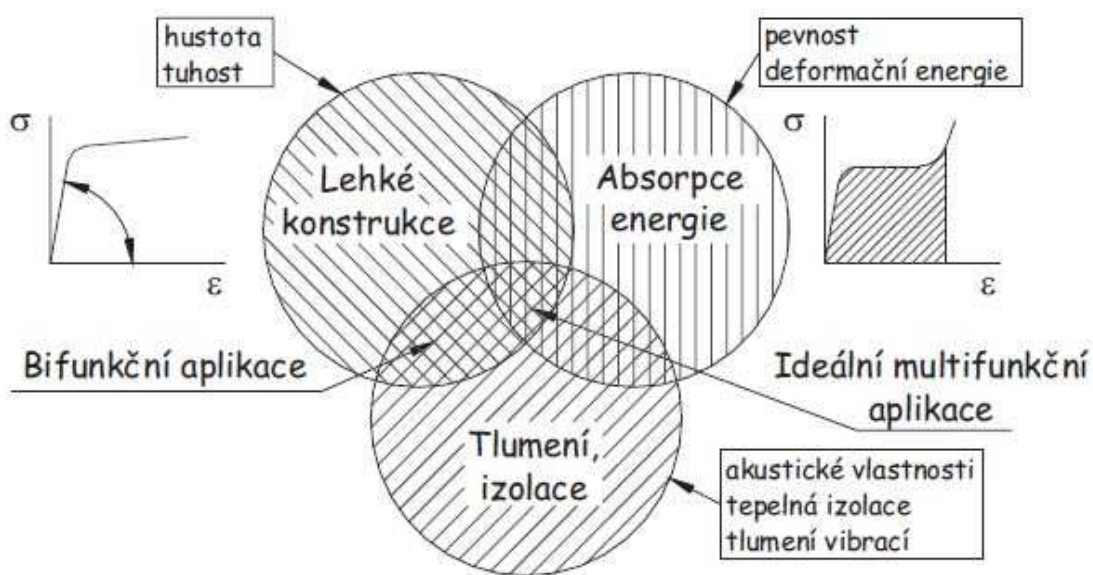
**Obr. 2.1** Příklady oblastí použití pórovitých kovů v závislosti na morfologii pórů [2].

## 2.1. Pěnový hliník

Co je pěnový hliník? Jedná se o vysoce porézní materiál tvořený hliníkem vyplňujícím prostory mezi plynovými póry, přičemž tyto póry tvoří víc než 60 % jeho objemu. Ačkoli má pěnový hliník póry uzavřené, jeho poréznost je díky mikrotrhlinám převážně otevřená [1].

Proč je převážná část výroby kovových pěn zaměřena na hliník a jeho slitiny? Především díky své nízké hustotě ( $2700 \text{ kg.m}^{-3}$ ), a teplotě tavení ( $660^\circ\text{C}$ ), vysoké tuhosti, houževnatosti, schopnosti mechanicky pohlcovat energii, tepelné a zvukové izolaci, výborné recyklovatelnosti, dostatečné korozní odolnosti a zejména nízkým nákladům na výrobu je právě hliník nejvhodnějším kovem, ze kterého se dá vyrábět vysoce porézní struktura vhodná i ke konstrukčním účelům [1, 5, 9].

Ideálním případem využití pěnového hliníku jsou aplikace, kde se využívá více předností tohoto materiálu. Na obr. 2.2 jsou uvedeny tři nejdůležitější přednosti, pro většinu konstrukčních aplikací ale v mnoha případech postačí kombinace pouze dvou z nich.



**Obr. 2.2** Aplikační možnosti vyztuženého pěnového hliníku [1].

## 2.2. Absorpce nárazové energie

Typickým příkladem multifunkčnosti hliníkových pěn je jejich použití v deformačních zónách automobilů (obr. 2.3 vlevo), kde se využívá jak jejich nízké hmotnosti při vysoké tuhosti, tak také, vzhledem k jejich vysoké pórovitosti, schopnost pohltit velké množství nárazové energie při havárii, zatímco napětí je omezeno pevností v tlaku materiálu [1, 5, 9]. Kovové pěny tak mají největší schopnost absorpce energie na jednotku hmotnosti než jiné kovové materiály [10].

Kromě využití v deformační zóně vozidel, se pohlcovače energie využívají i u výtahových a dopravníkových zařízení (obr. 2.3 vpravo), či v kabinách vojenských automobilů (obr. 2.4). Najdeme je také jako lehké pancíře obrněných vozidel, letadel a vrtulníků vyztužené korundovou keramikou se zvýšenou odolností vůči průniku projektilu a vznikajících tlakových vln způsobených výbuchy munice [1]. Tlumiče nárazů z kovové pěny můžeme také najít například u tramvají firmy Siemens [11].



**Obr. 2.3** Vlevo: Příklad použití hliníkové pěny v deformační zóně automobilu [12]. Vpravo: Pohlcovače nárazu z plněných hliníkových profilů firmy Cymat [11].



***Obr. 2.4** Pohlcovače energie z hliníkové pěny používané ve vojenských vozidlech na úchyty sedadel pro zvýšení ochrany posádky v kabině [7].*

## **2.3. Tlumení vibrací a zvuku, tepelné izolace**

Hliníkové pěny mohou za určitých podmínek tlumit vibrace a absorbovat zvuk. Navíc jejich tepelná vodivost zůstává nízká, zatímco mohou vydržet zvýšené teploty [11].

Zvuková vlna, která dopadá do porézního materiálu je částečně odražena a částečně vstupuje do struktury. Část této vlny se absorbuje a zbytek je přenesen pryč. Pokud je průměrná hloubka buňky pěny v rozmezí milimetrů, je tento mechanismus účinný pouze v poměrně vysoké frekvenci (v řádu  $> 300$  kHz). Se všemi mechanismy mohou kovové pěny dosáhnout poměrně vysoké absorpční úrovně až do výše 99 % pro určité kmitočty [2].

Pěny firmy Alporas se používají jako zvukové absorbéry podél dálnic a jiných frekventovaných silnic v Japonsku ke snížení hluku z dopravy. Desky s kovových pěn jsou také používány pro vnitřní absorpci zvuku ve vstupních halách veřejných budov [2]. Tlumiče z porézního hliníku nacházejí své uplatnění při snižování hluku u pneumatických systémů, kde je zdrojem hluku unikající stlačený vzduch [13]. Na obrázku 2.5 můžeme vidět tlumiče vibrací využívané nejčastěji ve stavebnictví.





**Obr. 2.5** Tlumiče vibrací a zvuku pro stavebnictví a jiná průmyslová odvětví [13].

Díky své nehořlavosti se z pěnového hliníku vyrábějí tepelné štíty a pouzdra vysokovýkonných tepelných zdrojů, ze kterých se ani při požáru neuvolňují žádné toxické plyny. Dále můžeme najít hliníkové pěny v součástech pro výměníky tepla (obr. 2.6), průmyslové plaváky odolávajícím vysokým teplotám a tlakům, kryty elektronických přístrojů pohlcující elektromagnetické záření a zvukoizolační panely do náročného prostředí (vysoká teplota, vlhkost, mořská voda, prašnost, proudící plyn, vibrace, požadavky na sterilitu prostředí apod.) [1].

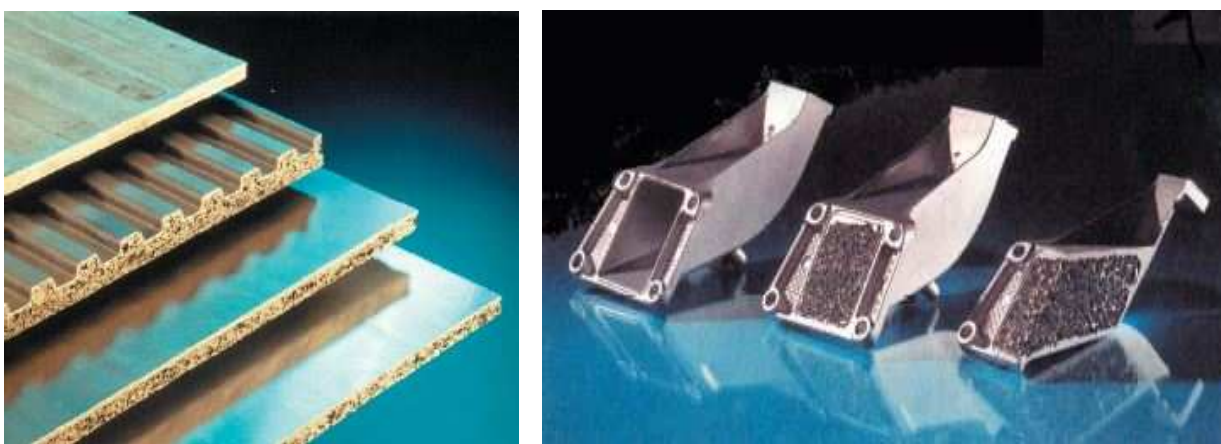


**Obr. 2.6** Standardní výměníky tepla využívající hliníkové pěny [7].



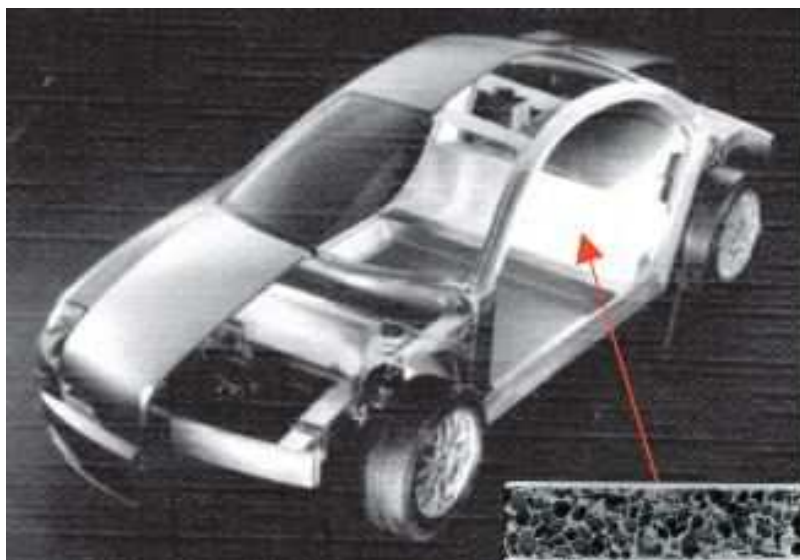
## 2.4. Lehké konstrukce

Pravděpodobně největší aplikační potenciál má pěnový hliník v oblasti lehkých konstrukcí, kde se pěny využívají k optimalizaci hmotnosti při zachování tuhosti strojírenské součástky [5]. Při povrchovém vyztužení součástky v místech, v kterých se očekává největší tahové namáhání, lze dosáhnout výrazné snížení hmotnosti součástí, při zachování požadovaných mechanických vlastností. Vhodné je též použití pěnového hliníku jako jádra velice lehkých sendvičových panelů nebo odlitků, kde nahrazují duté odlitky vyrobené pomocí pískových jader (obr. 2.7) [1].



**Obr. 2.7** Vlevo: Desky a sendviče z pěnového hliníku Alulight®. Vpravo: Prototyp držáku motoru BMW vyrobeného v LKR Ranshofen [1, 11].

Zvyšující se poptávka po bezpečnosti automobilů vede ke zvýšení jejich hmotnosti. To je v přímém rozporu s nízkou spotřebou paliva a vyžaduje opatření pro redukci váhy. Toto snížení však nesmí probíhat na úkor velikosti prostoru pro cestující [2]. Zjednodušeně řečeno, automobil s nižší hmotností spotřebovává méně paliva, a tím výrazně snižuje množství emisí. Příklad umístění pěnového kompozitu ze slitin hliníku nám ukazuje obr. 2.8.



**Obr. 2.8** Sendvičové panely z pěnového hliníku a jejich aplikace v konstrukci automobilu [1].

V oblasti lehkých konstrukcí se hliníkové pěny uplatňují u dopravních prostředků, robotů, dopravníků, automatizačních a manipulačních zařízení (obr. 2.9) [1].



**Obr. 2.9** Základ zvedacího ramene vyrobeného ze sendvičových panelů z hliníkových pěn [11].

## 2.5. Architektura a další využití

Vzhledem k tomu, že výroba a používání hliníkových pěn jsou ekologicky nezávadné, dají se používat také jako dekorační materiál nejen např. při stavbě příček kajut lodí, obkladů stěn letadel, autobusů, vlaků, lanovek, ale i jiných prostor, ve kterých se shromažďuje velký počet lidí, jako jsou kina a vstupní haly (obr. 2.10) [1]. Důležitým aspektem pro některé tyto aplikace je také zajímavý vzhled kovové pěny [2].



*Obr. 2.10 Obložení stěn kovovou pěnou ve Vancouver Convention Centre [9].*

Jelikož má hliník dobrou odolnost vůči oxidaci a chemickému působení kyselin, nachází pěnový hliník také využití v oblasti chemicky odolných filtrů. Tyto filtry mohou být součástí nádrží s kapalnými palivy a v případě poškození nádrže zabráňují rychlému vytečení hořlavých kapalin [8].

Jako další možnosti využití můžeme uvést například výrobu kapalinových, olejových nebo plynových filtrů, aplikace pro raketový průmysl, lodní stavitelství, výrobky pro sportovní průmysl nebo biomedicínu, podklady pro katalyzátory a další mnohá odvětví průmyslu [2, 7].

### 3. Metody výroby

Pórovité kovové materiály mohou být vyráběny mnoha různými metodami. Některé z nich jsou podobné metodám používaným k napěnění polymerů, zatímco jiné byly speciálně navrženy s ohledem na charakteristické vlastnosti kovů, jako je například možnost slinování kovových prášků anebo možnost elektrolytického nanášení.

Tyto metody výroby mohou být roztrženy podle skupenství zpracovávaného kovu na čtyři hlavní skupiny [2]. Jsou jimi:

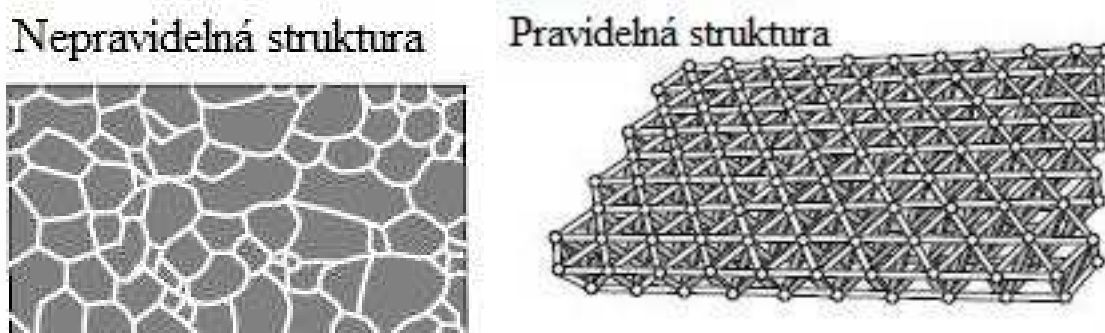
- **Kovové páry** - Vakuové napařování
- **Tekutý kov** - Přímé vzpěnění plynem
  - Vzpěnění pomocí zpěňovadla
  - Tuhnutí plynem přesycené taveniny
  - Tavení kovového prášku
  - Slévárenské metody
  - Sprejování
- **Kovový prášek** - Spékání dutých kuliček
  - Zachycování plynu
  - Vzpěnění suspenze
  - Spékání prášků nebo vláken
  - Reakční spékání
- **Ionizovaný kov** - Elektrochemické pokovování [2].

#### 3.1. Slévárenské metody

Z uvedených si podrobněji představíme slévárenské metody výroby kovových pěn, jelikož přímé zpracování roztaveného kovu do podoby pórovitých materiálů je ideální a jednou z často využívaných metod výroby kovových pěn. Výroba pórovitých materiálů totiž nemusí zahrnovat vždy jen samotné metody napěnění. U slévárenských metod mohou být struktury jiných materiálů použity jako šablony pro vytvoření buněčných materiálů, a to například volné nebo slinuté anorganické nebo organické granulované hmoty, duté kuličky nebo pravidelné polymerní struktury, které jsou převedeny určitou metodou na kovovou

konstrukci. Téměř vždy je ale nutné použít nějakou šablonu nebo model pro získání požadované morfologie [4].

Z obrázku 3.1 jsou ze schématu patrné dvě převládající struktury kovových pěn vyráběných některou ze slévárenských metod.



**Obr. 3.1** Schématické znázornění dvou struktur kovových pěn [10].

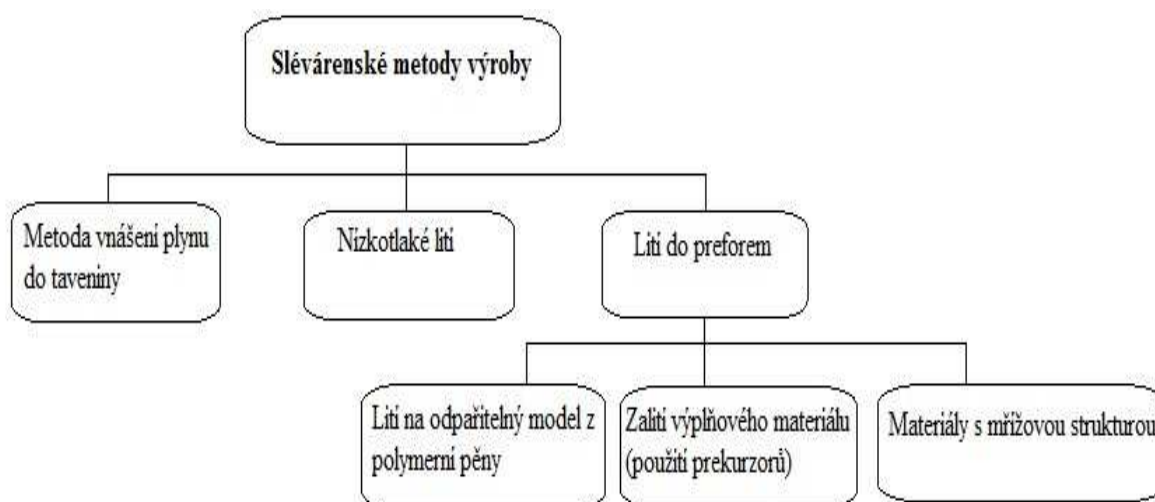
Slévárenské metody výroby jsou rozděleny podle dvou různých principů výroby, a to na využití plynu pro napěnění a použití preforem. A to:

- Použití plynu je založeno na expanzi plynu v kapalném prostředí, kde vytváří místní přetlak, díky kterému dochází ke vzniku vnitřní porozity. Touto metodou dochází po ztuhnutí ke vzniku uzavřené buněčné struktury. Nevýhodou je získání buněk rozdílné velikosti a tvaru. Stabilita stěn se zde obecně zlepšuje použitím oxidačních prvků (Ca) nebo částic kompozitů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo SiC) [14].

- Princip využití preforem je založen na vyplnění formy částicemi nebo vložením modelu. Hlavní metody jsou: zalévání částic gravitačně, pod tlakem nebo v částečném vakuu nebo přesné lití na polymerní pěny. Použité preformy jsou po odlití většinou zničeny. Takto získáváme materiály s otevřenou buňkovou strukturou [14].

Pravidelná buňková struktura je v této práci zastoupena pouze materiály s mřížovou strukturou. Ostatní metody lití do preforem nebo nízkotlaké lití vytváří nepravidelnou buňkovou strukturu s pevnou nebo bez pevné kůry. Metoda vnášení plynu do taveniny ze slévárenského hlediska představuje obdobu kontinuálního odlévání souvislých desek.

Schéma rozdělení slévárenských metod v této práci představuje obrázek 3.2.



**Obr. 3.2** Schéma slévárenských metod výroby kovových pěn

### 3.1.1. Vnášení plynu do taveniny

Celkově jsou pěny nestabilní systémy, protože energie působící na jejich velký povrch je až příliš vzdálená minimální hodnotě. Pěny tedy mohou být nanejvýš v metastabilním stavu, neustále se rozpadající určitou rychlostí. Stejně jako voda, tak i čisté kovové taveniny nemohou být napěněny, ale s pomocí přísad působících jako stabilizátory můžeme dosáhnout vytvoření pěny [4].

Metoda výroby řízeným naplyněním, při které se vhání plyn do hliníkové taveniny z externího zdroje, je používána kanadskou společností Cymat Corp. Touto metodou vyrábí pěnový hliník (v zahraniční literatuře označovaný SAF – Stabilized Aluminium Foam) podle patentů získaných od společnosti Alcan International Inc. A Norsk Hydro [1]. Ukázku takto vyrobených a rozřezaných desek z pěnového hliníku představuje obrázek 3.3.



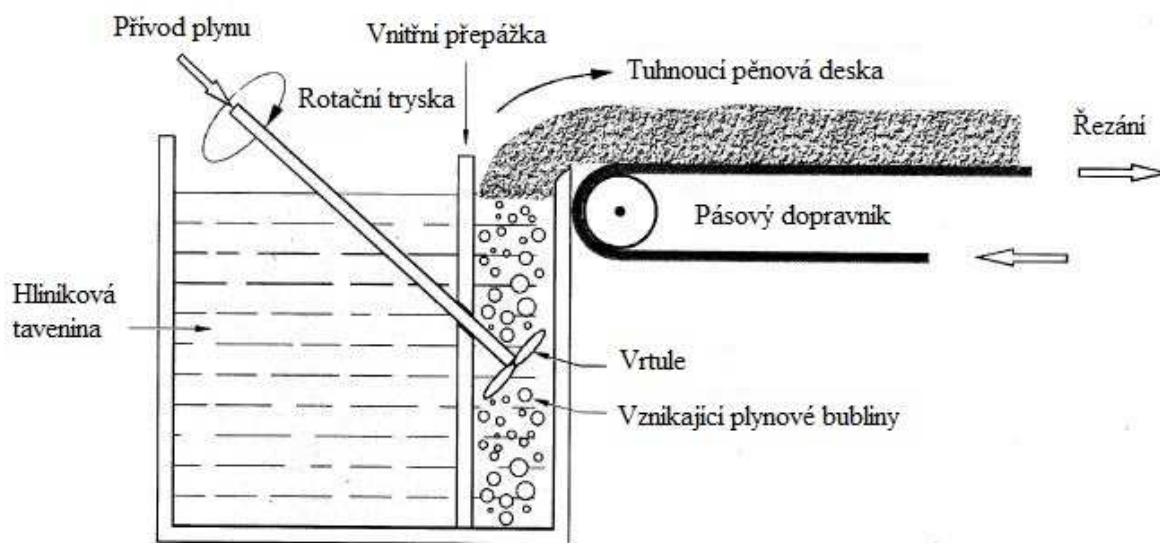


**Obr. 3.3** *Kontinuálně odlévaný a nařezaný pěnový hliník firmy Cymat Corp. [9].*

Ke stabilizaci a zvýšení viskozity taveniny, obvykle jedné z mnoha hliníkových slitin, se používají částice karbidů křemíku (SiC), oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nebo oxidu hořečnatého (MgO). Objemový podíl těchto částic se obvykle pohybuje v rozmezí od 10 % do 20 %, střední velikost částic je od 5  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$ . Pro tento krok je vyžadováno náročné míchání taveniny, pro zajištění rovnoměrného rozložení částic. Do taveniny se pomocí speciálního odstředivého dmychadla nebo vibrující trysky vhání plyn, a to buď vzduch, dusík nebo argon. Tak se v tavenině vytvářejí velmi jemné a rovnoměrně rozložené bublinky plynu. Viskózní směs bublin a roztaveného kovu se vznáší k povrchu taveniny, kde se mění na suchou tekutou pěnu. Tato stabilní hliníková pěna je vytahována dopravníkovým pásem z tavící pece, při čemž dochází k jejímu tuhnutí. Takto vyráběné desky obvykle dosahují tloušťky okolo 10 cm o hustotě v rozsahu 0,1 – 0,5  $\text{g/cm}^3$ . Tyto pěny dosahují porezity 80 – 95 %. Velikost pórů se zde pohybuje od 3 do 25 mm při tloušťce jejich stěn 50 – 85  $\mu\text{m}$ . Díky obsaženým keramickým částicím je tento materiál obtížně recyklovatelný a těžko obrobitelný, kdy při řezání a obrábění dochází k většímu opotřebení řezných nástrojů [1, 2, 4, 5, 6].

Takto vyráběná pěna je po vychladnutí charakterizována uzavřenými póry na vnějším povrchu. Výhody tohoto procesu spočívají ve výrobě velkého množství pěny při dosažení její nízké hustoty [11].

Schéma výroby pěnového hliníku kontinuálním odléváním je patrné na obrázku 3.4.



**Obr. 3.4** Výroba pěnového hliníku pomocí přímého vnášení plynu do taveniny [2].

### 3.1.2. Nízkotlaké lití 3-D pěnových odlitků

Firma Cymat Corp. také využívá nízkotlaké lití trojrozměrných odlitků (obr. 3.3), které se velmi podobá technologii nízkotlakého lití hliníku, běžně používané k výrobě hliníkových kol.

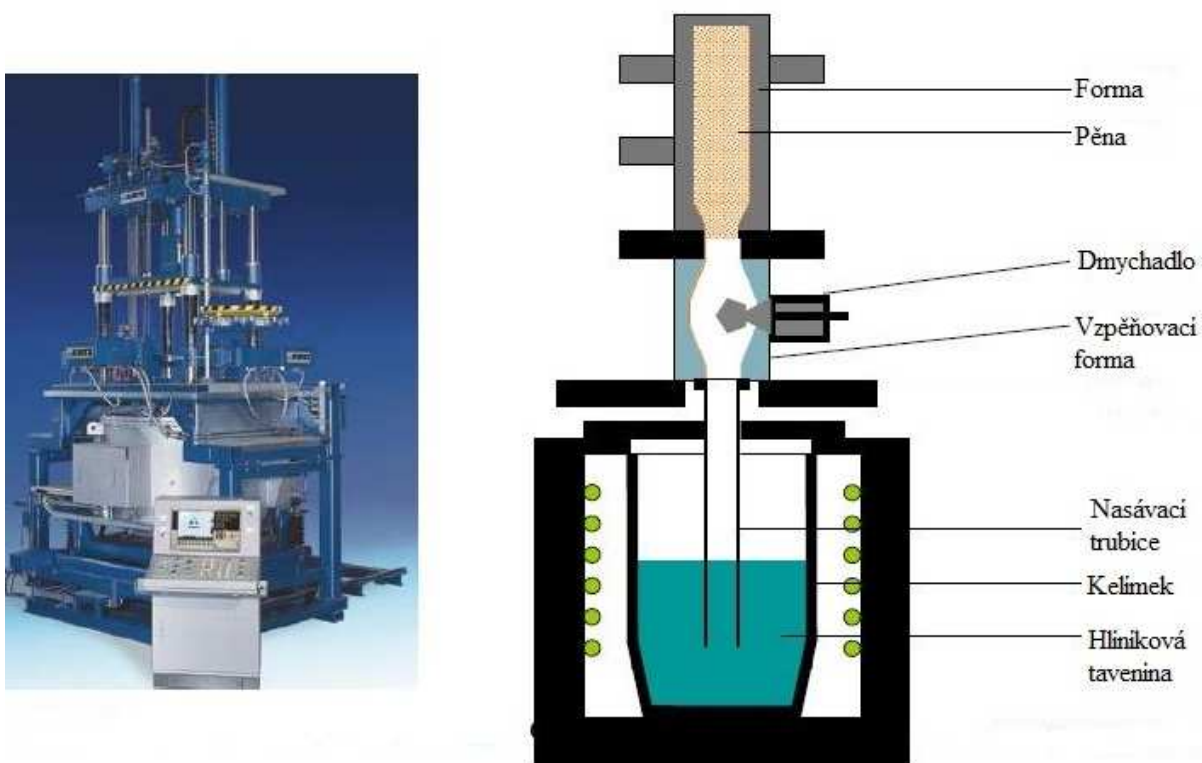
Jedná se další z metod řízeného naplynění, kde se pomocí odstředivého dmychadla do roztaveného kovu vhání plyn a vznikající bubliny napěňují taveninu. Tavenina s obsahem keramických částic (stabilizovaná hliníková pěna SAF) je vstřikována do dutiny formy. Tlak vstřikování je řízen tak, aby postačil k přesnému naplnění formy. Nesmí být ale příliš vysoký, aby nedošlo ke zhroucení vzniklé buněčné struktury kovu. Tato technologie umožňuje výrobu pěnového jádra v součásti, čímž se snižují náklady, hmotnost odlitku a komplikovanost výroby. Při této metodě nízkotlakého lití se dosahuje hustoty pěny 15 – 25 % [9].

Obrázek 3.5 ukazuje několik trojrozměrných pěnových odlitků vyráběných metodou nízkotlakého lití, včetně řezu jednoho z nich. Na obrázku 3.6 je znázorněn nízkotlaký licí stroj používaný firmou Cymat Corp. a schéma výroby.





**Obr. 3.5** Ukázka odlitků vyrobených nízkotlakým litím (vlevo řez odlitkem) [9].



**Obr. 3.6** Vlevo: Nízkotlaký licí stroj firmy Cymat Corp. Vpravo: Schéma výroby trojrozměrných pěnových odlitků [9].

### 3.1.3. Lití na odpařitelný model z polymerní pěny

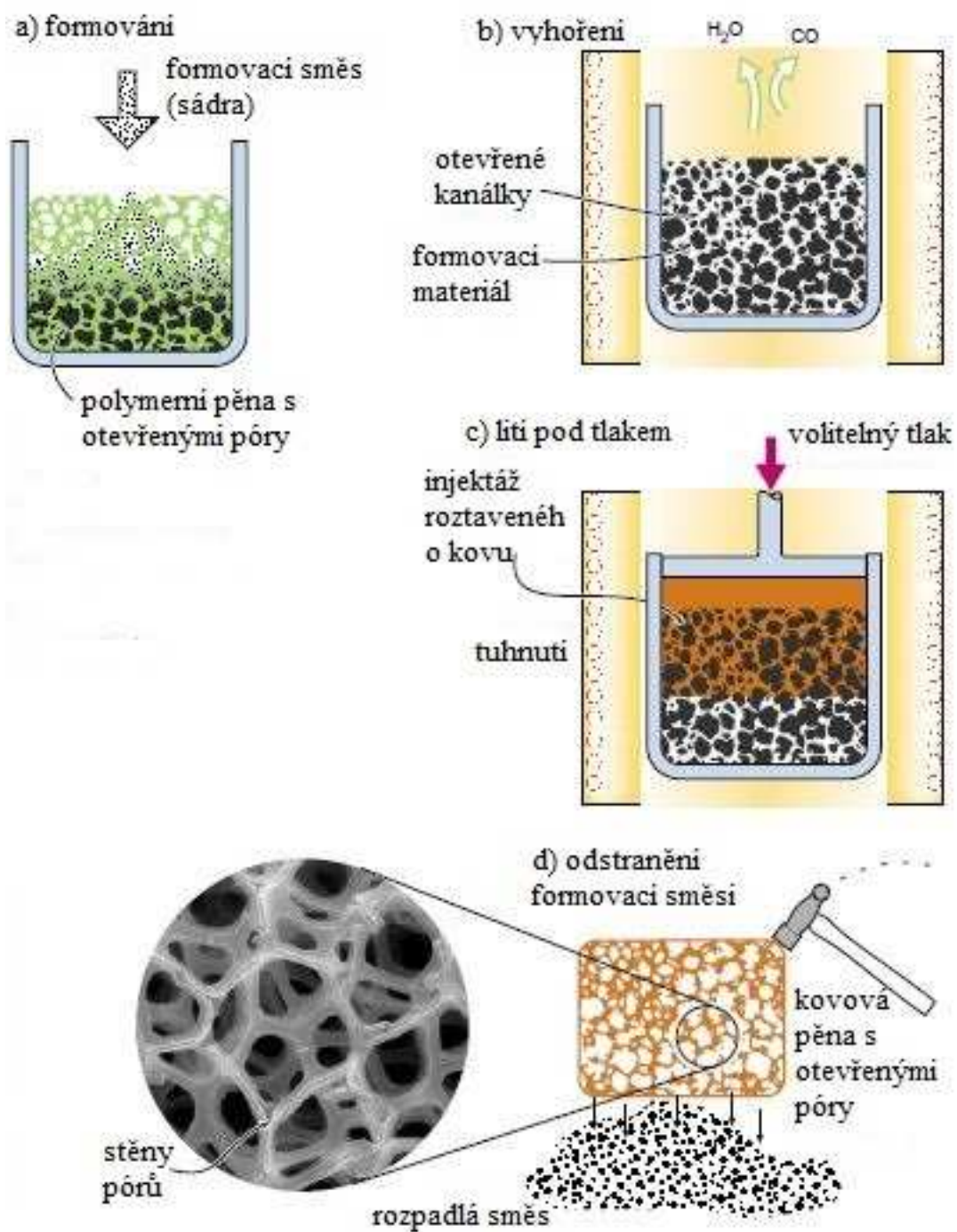
Kovové pěny mohou být vyráběny i jinými metodami než jsou metody řízeného naplynění taveniny. V tomto případě se odlévá na odpařitelný model, kterým je polymerní pěna, nejčastěji polyuretan, s otevřenými póry (obr. 3.7). Forma i s pěnou se zalije suspenzí ze žárovzdorného materiálu, např. směs mullitu, fenolové pryskyřice a uhličitanu vápenatého nebo jednoduše sádrou [2, 15, 16].

Prof. K. Rusín popsal zhotovení formy ze sádrových směsí odléváním z velmi tekuté břečky, která přesně vyplní složité tvary modelu a tak zaručuje přesné vytvoření formy. Do sádrových forem se odlévají složité modely ze slitin hliníku, mosazí a bronzů. Odlitky jsou hladké a dosahují přesností  $\pm 0,2$  mm na 300 mm [17].

Formování se musí provádět velmi opatrně, aby se zabránilo deformacím pórů velmi pružné polyuretanové pěny, které by mohly mít za následek poškození finálního výrobku (a). Zlepšení zalití pěny formovací směsí je dosaženo použitím vibrací během formování. Po vytvrzení se polymerní pěna odstraní tepelným zpracováním (b) a roztavený kov se odlévá do otevřených dutin, které přesně kopírují původní strukturu pěny. Kombinace tlakového lití a dostatečného předehtání formy mohou napomoci zaběhnouti kovu do úzkých dutin než při gravitačním lití (c). Po odstranění žárovzdorného materiálu (např. tlakovou vodou) získáváme kovovou strukturu, která je přesnou replikou originální polymerní pěny (d) [2, 15, 16].

Nevýhodou tohoto procesu je ne vždy úplné dosažení odlití všech částí pěny, spojené se špatným řízeným tuhnutím anebo poškozením pěny neopatrným vyjímáním z formy. [16]

Od roku 1967 je firma ERG Aerospace Corporation (Oakland, Kalifornie) předním výrobcem kovové pěny s otevřenou pórovitou strukturou pod obchodním názvem Duocel®. Z těchto pěn vyrábí komponenty pro letecký průmysl, národní obranu, její pěny se používají k výrobě polovodičů, biotechnologií a v dalších oblastech high-tech průmyslu [7, 15]

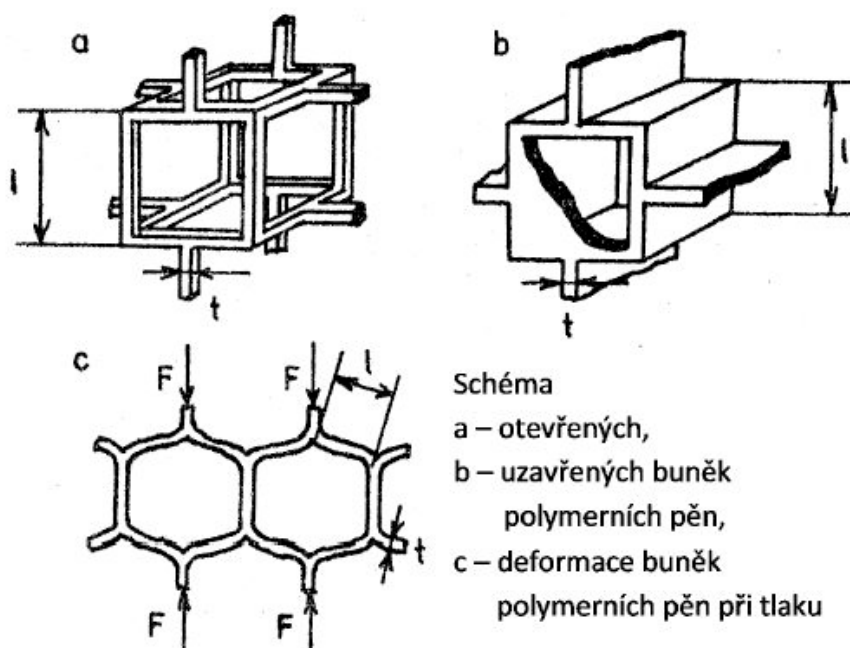


**Obr. 3.7** Schéma výroby kovových pěn metodou lití na odpařitelný model [10].

Tvarové součásti mohou být vyrobeny po předchozím přetváření polymerní pěny do požadovaného tvaru. Cena takových pěn je ovšem o něco vyšší. Nejčastěji je jako odléváný kov využíván hliník, ale touto metodou je možno zpracovat i jiné kovy (např. slitiny mědi). Hustota pěny a morfologii pórů určuje použitá polymerní pěna. Pórovitost je v rozmezí 80 - 97% s velikostí pórů 2,5 – 5 mm, mnohdy i menšími. [2, 15, 16].

### Polymerní pěna

Jedním z nejvíce využívaných moderních materiálů v současné době jsou bezesporu různé polymerní pěny. Jedná se tedy o uměle vytvořené pórovité materiály tvořené buď uzavřenými, nebo otevřenými buňkami (obr. 3.8). Polymerní pěny jsou pro svou nízkou hmotnost, odolnost proti tlakovému zatížení a dobré tepelné a zvukové izolační vlastnosti vhodné pro výrobu obalových a stavebních izolačních prvků [18]. V současnosti se polymerní pěny také využívají pro separaci plynných směsí jako plynové tlakové zásobníky, zejména pro skladování a separaci vodíku [19].



**Obr. 3.8** Schéma struktury polymerních pěn [18].

### 3.1.4. Zalití výplňového materiálu - prekurzorů

Lehké porézní kovy mohou být také vyrobeny odléváním kovu do preforem vyplněných anorganickými nebo organickými granulemi či dutými kuličkami s nízkou hustotou. Jako anorganické prekurzory mohou sloužit kuličky z pálené hlíny, vermikulit, rozpustné soli, granule keramzitu, pískové pelety, kuličky pěnového skla nebo duté kuličky oxidu hlinitého. Jako organické prekurzory mohou sloužit různé polymerní kuličky, pokud je tuhnutí kovu dostatečně rychlé, aby nedošlo k jejich předčasnému spálení a zborcení kovové struktury. Také je možné přidat tyto granule přímo do taveniny kovu [2, 15].

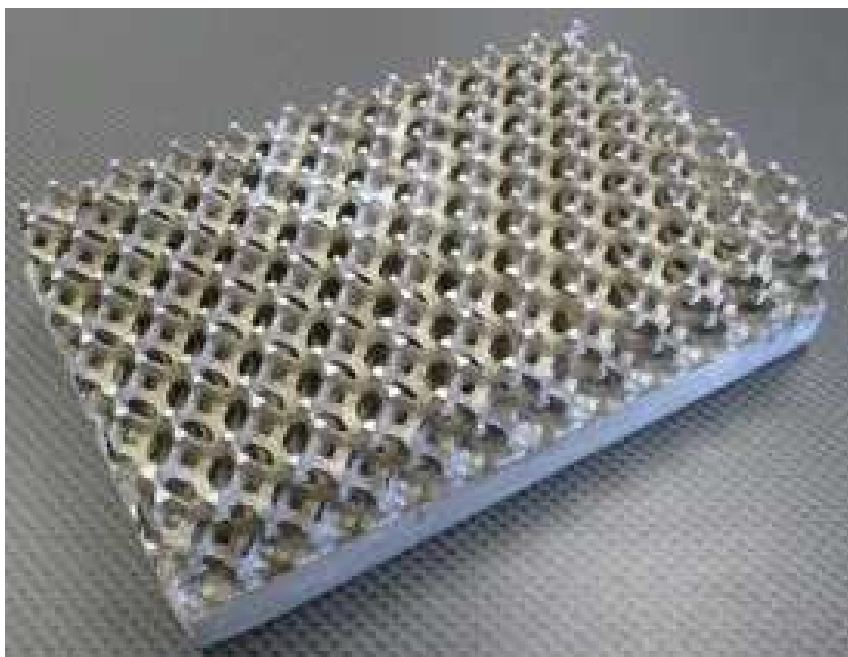
Přehřev velkého množství prekurzorů před litím je nutný pro zabránění předčasnému zatuhnutí taveniny, zejména pokud materiál prekurzorů vykazuje vysoký odvod tepla. Vzhledem k vysokému povrchovému napětí taveniny nemusí být prekurzory smáčeny kovem, tím pádem nemusí dojít k vyplnění kovem všech mezer mezi granulemi. Tomu lze zabránit vytvořením vakua mezi granulemi a odléváním pod tlakem. K tomu se používají vakuové tlakové licí stroje pro metodu die-casting [2].

Granule buďto mohou zůstat po odlití v kovovém materiálu jako kompozit (tzv. syntaktické pěny) nebo se odstraní loužením ve vhodných rozpouštědlech či kyselinách anebo se odstraňují tepelným zpracováním. To lze úspěšně provést, jen pokud je obsah granulí dostatečně velký, aby byly všechny granule navzájem propojeny [2].

Jednou z hlavních výhod této metody výroby je kontrola pórovitosti pomocí známé granulometrie prekurzorů. Na druhé straně lze takto dosáhnout oproti jiným metodám pórovitosti nižší než 80 % [2]. Touto metodou lze zpracovávat širokou škálu kovů, jako jsou hliník, hořčík, zinek, olovo, cín a další [15].

Na tomto principu je založena výroba CTIF pěn, kdy je odlévaným materiálem hliníková slitina za použití klasického slévárenského procesu (gravitační lití do pískových forem). Tvar používaných prekurzorů bývá kulovitý o průměru 5, 10 a 15 mm [14]. Tato metoda umožňuje zvolit nejlepší a nejekonomičtější řešení, co se tvaru a velikosti odlitků týče, přes zvolení metody lití až po zvolení kovu, ze kterého bude odlitek vyroben. Ve všech případech tato metoda umožňuje výrobu odlitků složitých tvarů a různých struktur a funkcí daleko snadněji, než ostatní metody výroby kovových pěn. [20]

Ukázku takto vyrobené pěny představuje obrázek 3.9. Pěna byla vyrobena slévárnou Tabourin Bézile ve Vénissieux, založenou roku 1946. Tyto pěny slévárna vyrábí ve spolupráci s CTIF [21].



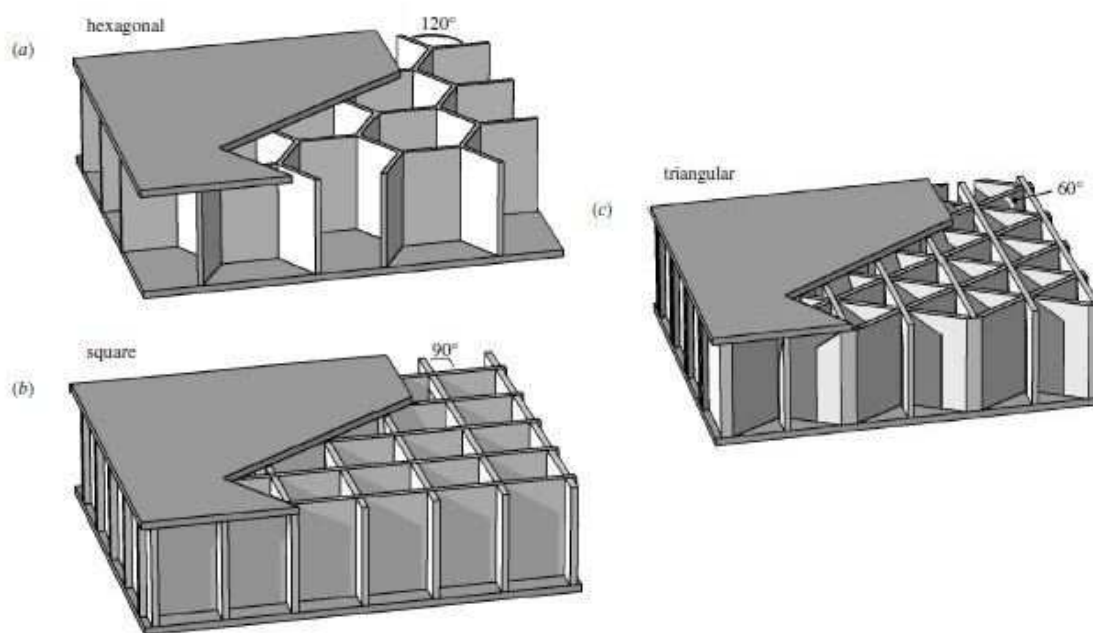
*Ob. 3.9 Hliníková CTIF pěna vyrobená slévárnou Tabourin Bézile [21].*

### **3.1.5. Materiály s mřížovou strukturou**

Dalším vysoce porézním kovem s pravidelnou buňkovou strukturou jsou materiály s mřížovou strukturou, v zahraniční literatuře označovány jako LBS (Lattice block structure) nebo CCS (cast cellular structure) materiály. Objem kovu ve struktuře těchto materiálů bývá často nižší než 20 %.

Původně se tyto materiály s uzavřenou buněčnou strukturou tvořící prizmatické struktury vytvářely z tenkých perforovaných plechů nebo plechových prvků (obr. 3.10), ovšem plně otevřené buněčné struktury lze dosáhnout výrobou navzájem propojených tenkých prutů o jakémkoli průřezu. Některé materiály s mřížovou strukturou se vyrábí plošným tvářením nebo různými metodami pojení jednotlivých plátů, např. mikrosvařováním, ale stále častěji je zájem o lité struktury. Výhodou odlévání mřížových struktur je ta, že tato metoda nevyžaduje složité montáže, lepení nebo svařování, abychom dosáhli stejné struktury [22, 23]. Také je možnost vyrobit různé geometrické tvary, možnost výroby z různých škál kovů a snadná recyklovatelnost těchto materiálů [24].





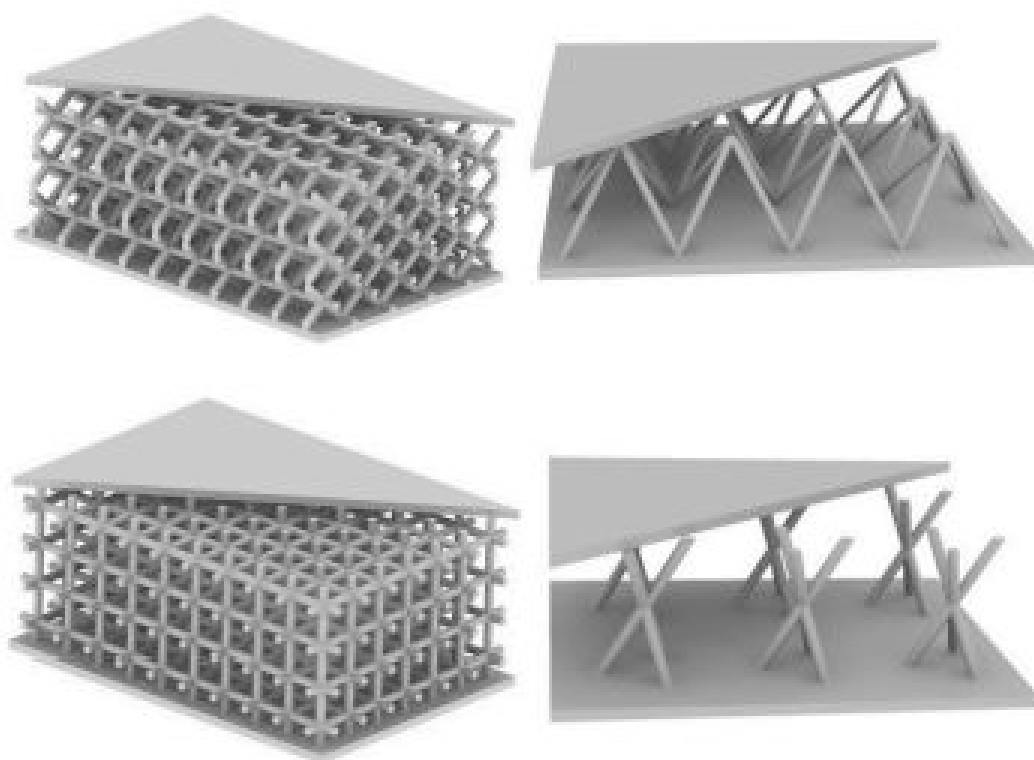
**Obr. 3.10** Ukázka tří základních typů buňkové struktury sendvičových panelů a) hexagonální buňky (tzv. včelí plástve), b) čtvercové buňky, c) trojúhelníkové buňky [22].

Trojrozměrné mřížové struktury se vyznačují vzájemně propojenými prázdnými prostory, kde je struktura složena z opakujících se jednotlivých buněk. Jejich velikost se může pohybovat od desítek mikrometrů až po desítky milimetrů [22, 23].

Ve své nejjednodušší formě mají mřížové panely vyrobené litím trojúhelníkový tvar buněk (obr. 3.11), který jim poskytuje pevnost a tuhost. Dalšími možnostmi otevřených buněk je opakování tvarů po směrových osách x a y. Pokud tvar jednotlivých mříží přesáhne do osy z, získáváme trojrozměrnou strukturu buněk (obr. 3.12) [25].



**Obr. 3.11** Detail mřížového odlitku ze slitiny hliníku [24].



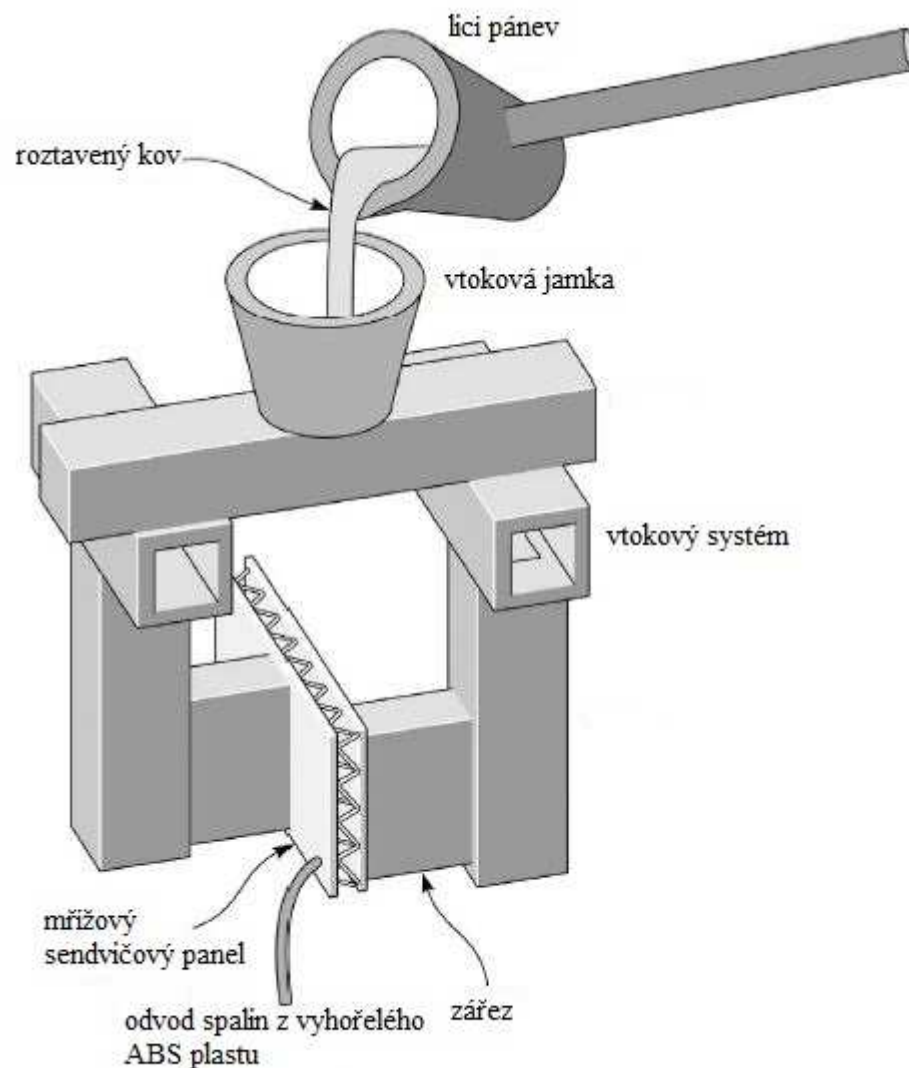
**Obr. 3.12** Sendvičový materiál s pravidelnou mřížovou strukturou [23].

Pro výrobu tohoto vysoce porézního typu materiálu se využívá metoda lití na vytavitelný nebo spalitelný model z vosků či polymerů. Modely mohou být vyrobeny vstřikováním polymerů nebo lepením jednotlivých prvků dohromady vrstvu po vrstvě pomocí lepidla, jako je tomu např. u polystyrenových modelů [2].

Další často využívanou metodou výroby modelu je technologie Rapid Prototyping jako je Fused Deposition Modeling. Model, často z ABS plastu, je pak připojen ke vtokovému systému se zářezy a nálitky, které jsou vyrobeny litím z vosku. Celý model je pak namáčen do keramické licí suspenze. Po vytvrzení keramiky se model odstraní žíháním a vzniklá dutina se zaplní tekutým kovem. Po zatuhnutí je keramika odstraněna a odlitek podroben kontrolám na zjištění případných vad. Kov pro výrobu mřížové struktury musí vykazovat dobrou zabíhavost. Kovy s nízkou zabíhavostí je takto velmi obtížné odlévat z důvodu velmi malých průměrů jednotlivých kanálků struktury [22, 23].

Schéma výroby znázorňuje obrázek 3.13.



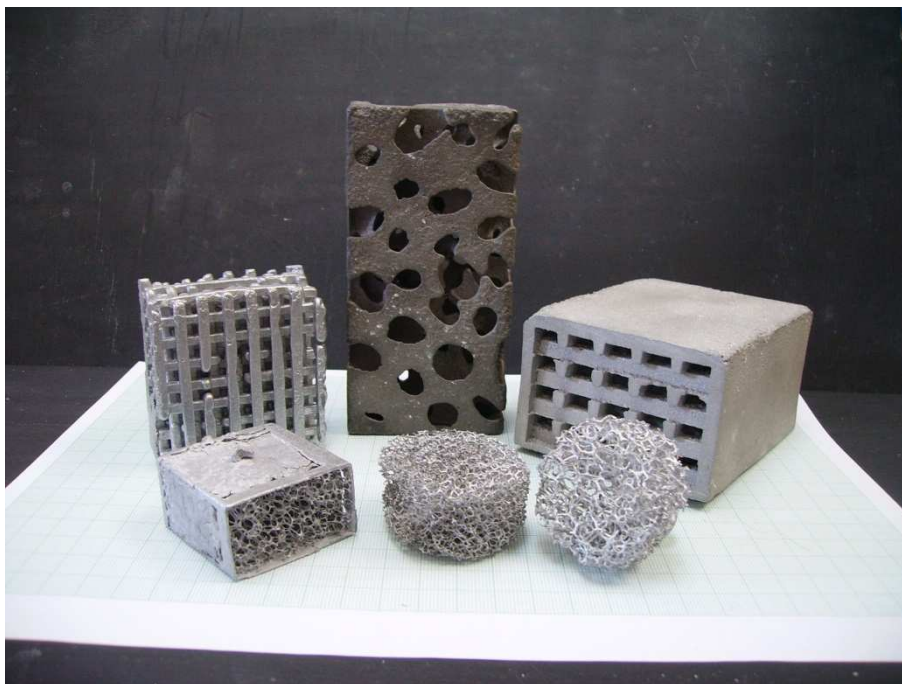


**Obr. 3.13** Schéma odlévání mřížové struktury s modelem z ABS plastu [22].

Mřížové materiály jsou navrženy tak, aby například nosníky z nich vyrobené odolaly zatížení na tah nebo tlak bez ohýbání. Absence ohybu zajišťuje tuhost a sílu, která se lineárně mění s měnící se relativní hustotou [10]. Z toho důvodu se takto vyrobené materiály často využívají jako jádra sendvičových panelů, nebo jako nepružné odlehčené vzpěry pro konstrukce pod tlakovým zatížením. Velmi oblíbené jsou také při stavbě lodí [22].

## 4. Praktické řešení

Praktická část mé diplomové práce popisuje podrobnější řešení již dříve ověřených slévárenských metod výroby kovových pěn a pórovitých kovových materiálů, které volně navazují na diplomovou práci Ing. Iriny Zyryanové - Vaculíkové z roku 2011. Z různých metod byly vybrány tři, které nejlépe korespondují s dostupným zařízením a možnostmi laboratoří. Jsou jimi, jako hlavní téma této práce, lité kovové pěny s pravidelnou buňkovou strukturou, pěny vzniklé zaléváním výplňového materiálu, tzv. prekurzorů, a dále výroba kovových pěnových filtrů ze slitin hliníku, jimiž se podrobněji ve své diplomové práci zabývá Bc. Ivana Kroupová. U všech těchto pěn se jedná o metodu odlévání do preforem, které po odstranění zanechají pórovitou kovovou strukturu. Souhrnnou ukázkou všech vyrobených typů pěn představuje obrázek 4.1.



**Obr. 4.1** Ukázka různých kovových pěnových filtrů a pórovitých kovových materiálů s pravidelnou a nepravidelnou buňkovou strukturou.

## 4.1. Lité kovové pěny s nepravidelnou buňkovou strukturou

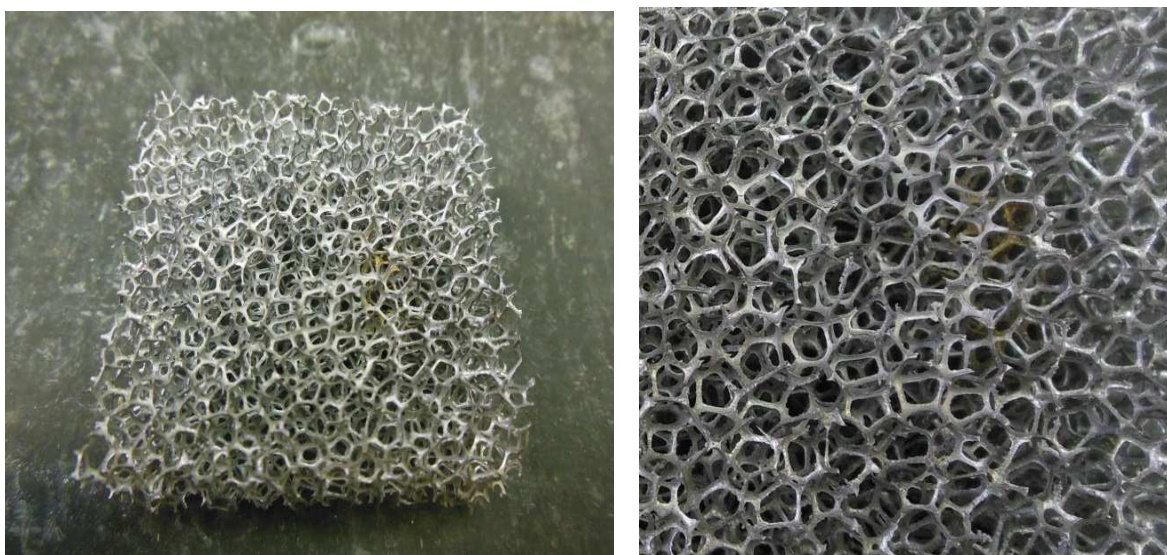
Lité pěny s nepravidelnou strukturou jsou charakterizovány svými nahodile umístěnými otevřenými, navzájem propojenými, nebo uzavřenými póry, o různé velikosti. Z toho důvodu u nich nikdy nelze zaručit stoprocentní reprodukovatelnost struktury a mechanických vlastností.

Při praktickém řešení se pracovalo se dvěma možnými způsoby výroby preforem:

- Výroba hliníkových filtrů litých na odpařitelný model
- Zalévání výplňového materiálu - prekurzorů

### 4.1.1. Kovové filtry ze slitin hliníku

Pro výrobu kovových pěnových filtrů byla zvolena a ověřena metoda výroby lití na odpařitelný model vyrobený z polyuretanové pěny. Princip výroby, při kterém dochází k získání lité kovové pěny s otevřenými póry (obr. 4.2), která je přesnou kopií polyuretanového modelu, je popsán v kapitole 3.1.3.



**Obr. 4.2** Vlevo: Odlitý hliníkový pěnový filtr. Vpravo: Detail pórovité struktury.

Pro výrobu kovové pěny byly jako odpařitelné modely použity polyuretanové pěny s otevřenými póry o různé definované pórovitosti a tloušťce stěn (obr. 4.3 vlevo). První pokusy proběhly na pěnách žluté barvy o neznámé pórovitosti a pěnách s definovanou pórovitostí černá Bulpren S32450 a S32380 a modrá pěna Bulpren S32450 pro vodní filtry.



**Obr. 4.3** Vlevo: Ukázka použitých polyuretanových pěn různé tloušťky a pórovitosti.

Pro odlévání do sádrových forem bylo nutné vybrat typ sádry schopný odolat teplotě okolo 800 °C. Tato teplota byla pokusy vyhodnocena jako nejlepší pro přehřev forem z důvodu zvýšení zabíhavosti kovu. Nejdůležitějším aspektem výběru byla co nejnižší, ideálně nulová, hodnota tepelné dilatace sádry, kterou garantují výrobci šperkařské sádry, nebo sádry pro přesné lití. Dalším požadavkem byla schopnost sádry dokonale kopírovat tvar modelu při co největší hladkosti povrchu. Na základě toho byly zvoleny dva dostupné typy sádry: speciální sádra pro slitiny hliníku M 028 a již dříve vyzkoušená šperkařská sádra Kerr Lab Satin Cast 20.

Zjištěný poměr vody a sádry, v závislosti na druhu sádry a typu formy, je uveden v tabulce 4.1.

**Tabulka 4.1** Poměr složek formovací směsi podle typu formy a druhu sádry

Typ formy	Sádra M 028		Sádra Kerr Lab	
	Sádra [g]	Voda [ml]	Sádra [g]	Voda [ml]
Nízká forma	460	171	450	175
Vysoká forma	540	190	500	195

Formovalo se uchycením modelu z polyuretanové pěny pomocí roztaveného vosku na silikonový podpůrný klobouček (obr. 4.4), kde po zatuhnutí sádry a odstranění kloboučku sloužila vzniklá dutina zároveň jako vtoková jamka (obr 4.5).



**Obr. 4.4** Nalepené polyuretanové pěny na silikonovém kloboučku a připraveny k zaformování



**Obr. 4.5** Vytvořená vtoková jamka po sundání silikonového kloboučku.



Mísení sádry v uvedeném poměru bylo provedeno na vakuovém mísiči INDU MIX (obr. 4.6 vlevo). Mísení je zde založeno na principu sníženého tlaku, díky čemuž se při mísení předchází naplynění směsi a vzniku vzduchových bublin ve formě [26]. Osvědčila se doba mísení sádry 5 minut a vibrace po dobu 3 minut.

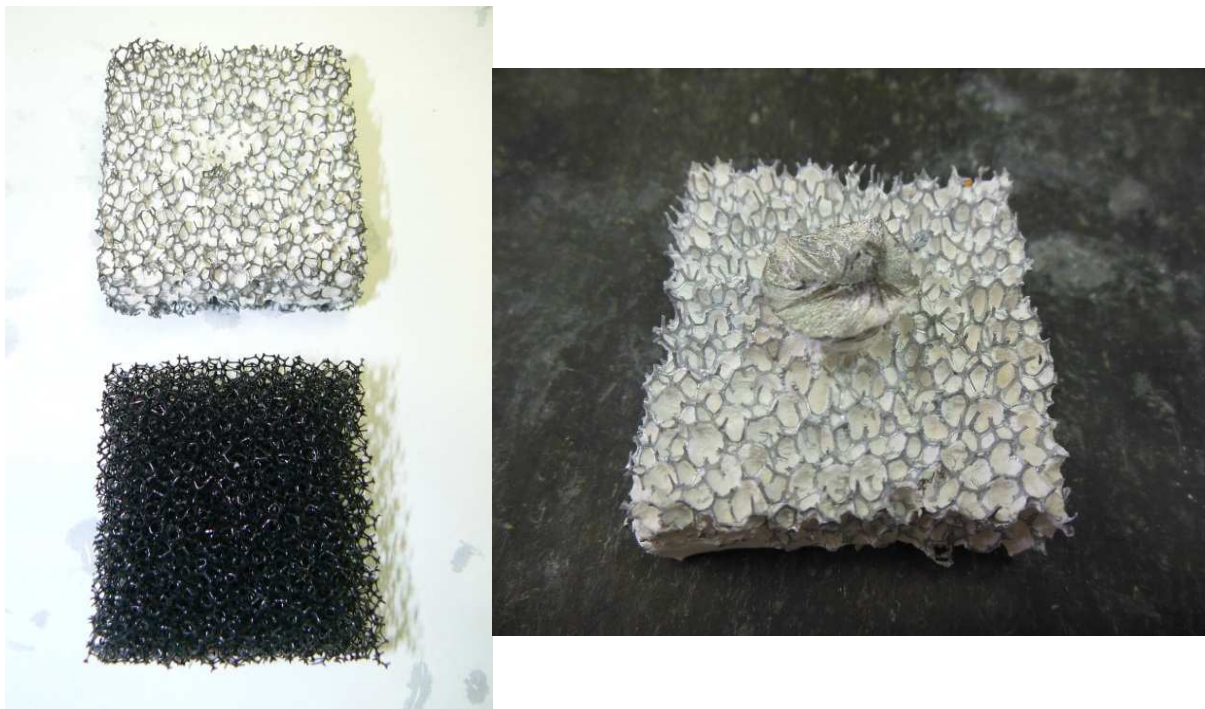
Po zaformování bylo nutné formy vysušit a následně vyžít na teplotu na 800 °C z důvodu lepší zabíhavosti.

Tavení a odlévání vsázky bylo prováděno pomocí nízkotlakého licího stroje INDUTHERM MC 15+ (obr. 4.6 vpravo), který kombinuje výhody vakuového tavení a přetlakového lití. Po natavení vsázky při podtlaku 1 bar následovalo překlopení licího stroje o 90°. Po odlití se licí stroj se automaticky přepnul do přetlaku 2 bar, které zajistilo potřebné zaplnění dutiny formy roztaveným kovem. Jako materiál pro odlévání pěn byla zvolena slitina hliníku AlSi10MgMn.



**Obr. 4.6** Vlevo: Zařízení Indu Mix s nastavitelnou rychlostí mísení, vibračním zařízením a časovačem. Vpravo: Licí stroj INDUTHERM MC 15+ s výkonem 3,5 kW pro rychlý indukční ohřev [26].

Po různých postupech lití bylo zjištěno, že nejlepší výsledky byly získány v kombinaci sádry Satin Cast 20 od firmy Kerr Lab a černé polyuretanové pěny Bulpren S32450 (obr. 4.7). Ukázkou umístění vtoků na odlitých pěnách představuje obrázek 4.8.



**Obr. 4.7** Pěna Bulpren S32450 – ukázka modelu a odlité pěny.



**Obr. 4.8** Žlutá pěna s různě umístěným vtokem – sádra Kerr Lab (model, po odlití, s částečně odstraněnou sádrrou).



Pro zlepšení zabíhavosti, pevnosti struktury pěn a zvětšení tloušťky stěn mezi jednotlivými póry, byl použit nátěr. Zlepšení požadovaných vlastností se ověřovalo na modelech namočených do roztaveného vosku (obr. 4.9) a na modelech opatřených jednou či dvěma vrstvami akrylové barvy ve spreji (obr. 4.10). Lepších vlastností se dosáhlo s použitím akrylové barvy, se kterou se dále pokračovalo.



**Obr. 4.9** Vzhled polyuretanové pěny po namočení do roztaveného vosku



**Obr. 4.10** Ukázka polyuretanových pěn s aplikovanou akrylovou barvou

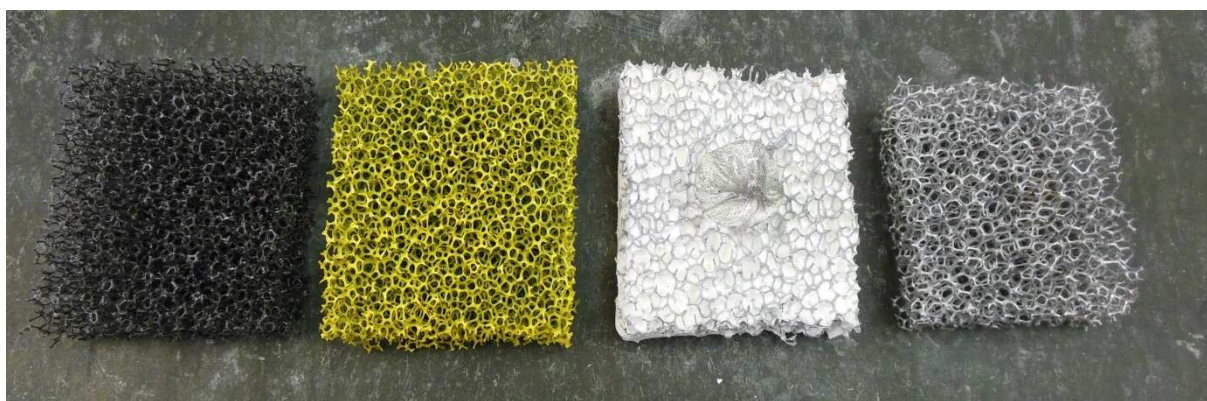


Odstraňování sádry z odlité pěny se provádělo v prvním případě ponořováním odlité pěny do ultrazvukové lázně (obr. 4.11). Tento postup se osvědčil jako účinný, ale velmi zdoluhavý. Ve snaze najít efektivnější způsob odstranění sádry z odlitých pěn bylo vyzkoušeno rozpouštění sádry v roztoku kyseliny  $\text{HNO}_3$ .



**Obr. 4.11** Ultrazvuková lázeň.

Vzhled budoucí kovové pěny v průběhu výroby, od modelu až po hotovou kovou pěnu zbavenou sádry, nám představuje obrázek 4.12.



**Obr. 4.12** Ukázka pěn. Zleva model, model s nástrihem, pěna po odlití, vyčištěná pěna.

### 4.1.2. Použití prekurzorů jako výplňového materiálu

Pod pojmem prekurzory rozumíme kulovité částice z organických nebo anorganických materiálů, které se po zalití tekutým kovem ve formě napomohou k vytvoření pórů ve struktuře svým vlastním objemem a po ztuhnutí kovu jsou z materiálu odstraňovány například žíháním. Pro snadné odstranění prekurzorů z materiálu se předpokládá, že jsou vyrobeny z materiálu s výbornou rozpadavostí po tepelné expozici, a že jejich obsah ve formě je dostatečný, aby došlo k propojení jednotlivých pórů vzájemným dotykem prekurzorů. Jednotlivé výplňové materiály a technologii výroby popisuje kapitola 3.1.4.

Po zvážení všech možností se jako nejvhodnější prekurzory jeví ty, vyrobené z jádrové směsi s organickou pryskyřicí, díky své výborné rozpadavosti. Jelikož velké množství sléváren využívá pro výrobu nejrůznější jádra pojená pryskyřicemi, mohou poškozená nebo nevyužitá jádra, která představují pro slévárnu už jen odpadní materiál, takto nalézt využití.

Pro účely našeho pokusu byla použita jádra pojená resolovou pryskyřicí a jádra vyrobená croningovou metodou.

Jednotlivé prekurzory byly vytvořeny rozbitím jader na malé kousky a jejich vzájemný omíláním pro získání přibližně kulovitého tvaru. Odlitky jednoduchého tvaru, kotouč a hranol, byly formovány do spodního rámu s vtokem zaústěným shora. Formovalo se do bentonitové směsi. Připravenou formu na lití, s dutinou zaplněnou prekurzory, znázorňuje obrázek 4.13.



*Obr. 4.13 Forma s dutinou vyplněnou prekurzory.*

Odlitky s prekuzory vyrobenými z resolových jader byly odlévány z hliníkové slitiny AlSi10MgMn. Po odlití prekuzory zůstaly stále v odlitku v pevném stavu. Pro jejich odstranění bylo nutné odlitky vyžít, aby došlo k vyhoření zbytků pryskyřice, a následně otryskat. Odlitky s resolovými prekuzory znázorňuje obrázek 4.14.



**Obr. 4.14** Odlitky ze slitiny AlSi10MgMn s prekuzory z resolové pryskyřice.

Odléváním kovem pro croningové prekuzory byla litina s lupínkovým grafitem EN GJL – 200. Tekutý kov zaběhl u odlitku hranolu úplně, u kotouče z větší části. Nezaběhnutí mohlo být způsobeno nepravidelným tvarem prekuzorů nebo jejich nevyhovující vzájemné poloze (obr. 4.15). Cronicové prekuzory, po tepelné expozici během lití, vykazovaly výbornou rozpadavost bez nutnosti větší mechanické síly. Pro úplné odstranění stačilo pouze otryskání odlitků.

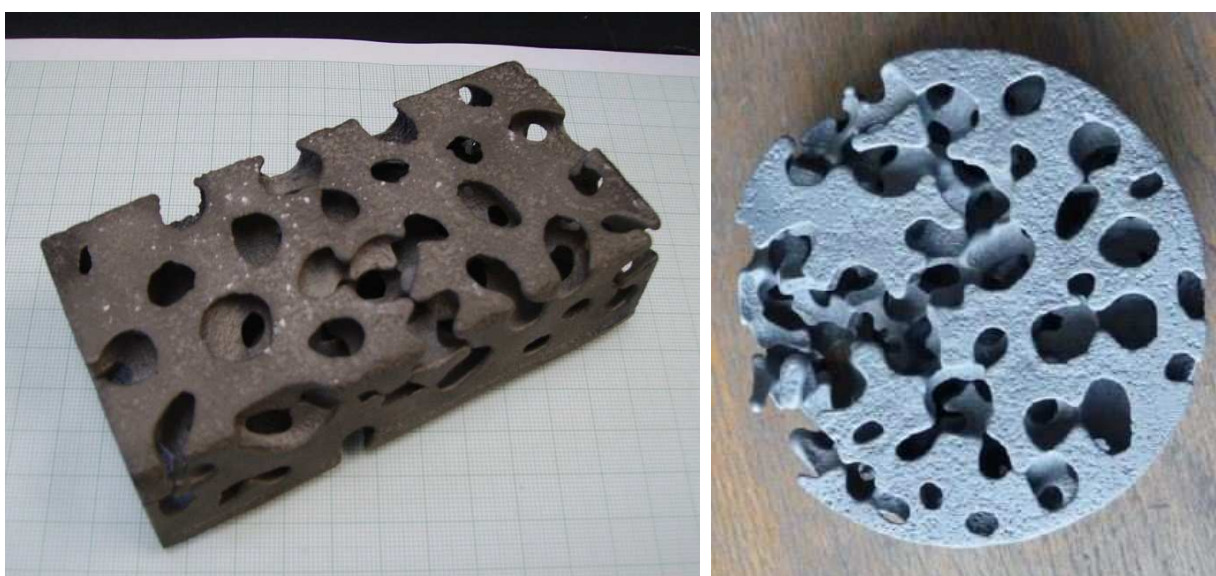




**Obr. 4.15** Částečně nezaběhnutý odlitek ve formě (prekurzory z croningové směsi).

Vzniklé póry byly nahodile rozmístěny a navzájem propojeny. Takto vyrobený materiál by byl velmi vhodný pro využití v oblasti lehkých konstrukcí, jelikož došlo díky velikosti a množství pórů ke značnému snížení hmotnosti odlitku. Největší výhodou takto vyrobených odlitků je snížení nákladů na prekurzory, které představují vlastní odpadní materiál mnoha sléváren.

Hotové litinové odlitky hranolu a kotouče, za použití croningových prekurzorů, představuje obrázek 4.16.



**Obr. 4.16** Ukázka hotových odlitků po očištění.

## 4.2. Lité kovové pěny s pravidelnou buňkovou strukturou

Kovové pěny s pravidelnou buňkovou strukturou charakterizuje, jak už jejich název napovídá, právě pravidelné uspořádání stejně velkých buněk o stejné tloušťce stěn mezi nimi. Díky tomu je možné předem předpovídat jejich mechanické vlastnosti.

Lité pěny s pravidelnou buňkovou strukturou jsou v této práci rozděleny na:

- materiály s mřížovou strukturou
- materiály s pravidelnými kulovitými buňkami

Výroba pěny s mřížovou strukturou byla ověřena v diplomové práci Ing. Iriny Zyryanové – Vaculíkové. Od některých navrhovaných postupů výroby bylo ustoupeno jako od nevyhovujících a byly nahrazeny jinými, se kterými se dále pracovalo.

### 4.2.1. Materiály s mřížovou strukturou

Oproti původním pokusům, kde se pracovalo s lepeným spalitelným modelem z polystyrenu zalitým do sádrové směsi, bylo nyní přihlédnuto k výrobě jader z pískových formovacích směsí pojených organickými pryskyřicemi, jako k více vyhovujícím. Toto rozhodnutí bylo učiněno na základě vysoké pracnosti při výrobě polystyrenových modelů, kdežto jádra z pískových směsí vykazují snadnou výrobu a dobrou reprodukovatelnost. Jejich největší předností je ovšem možnost snadno vyrábět nejen odlitky bez pevné kůry ale i s pevnou povrchovou kůrou.

Původní odlitek s mřížovou strukturou s polystyrenovým modelem od Ing. Iriny Zyryanové – Vaculíkové je vyobrazen na obrázku 4.17.

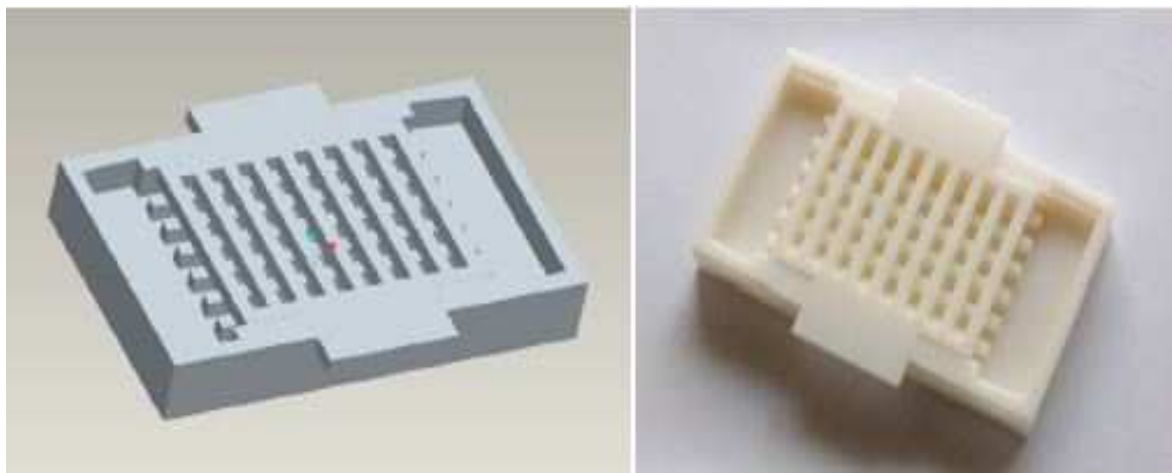


**Obr. 4.17** Odlitek s mřížovou strukturou za použití spalitelného polystyrenového modelu.

#### 4.2.1.1. Model

Jelikož jádra pro odlitky s mřížovou strukturou mají složitý tvar, bylo nutné vytvořit vhodný jaderník. Na základě návrhů a požadavků byl pro potřebu již dříve prováděných pokusů vyhotoven pětidílný rozložitelný jaderník (obr 4.18), umožňující výrobu mřížových odlitků s otevřenými buňkami i s pevnou povrchovou vrstvou.

Virtuální 3D model jaderníku byl navrhnout a vypracován v modelačním programu ProEngineer a jeho výroba byla provedena pomocí technologie Rapid Prototyping a 3D tisku. Tato technologie umožňuje na základě počítačových dat vyrobit fyzický model nebo finální produkt v krátkém čase v porovnání s klasickými technologiemi. Zdrojem pro počítačový model takto mohou být CAD systémy, 3D scannery a vědecká nebo technická data. Model je vytvářen vrstvu po vrstvě, tím je možné snadno zhotovit téměř libovolně složitou geometrii. Model je takto vytvářen z termoplastu akrylonitril-butadien-styren, zkráceně ABS. Tento materiál díky svým vlastnostem (pevnost v tahu 22 MPa, modul pružnosti v tahu 1,627 GPa, tepelná odolnost 96 °C) umožňuje využívat modely jako funkční prototypy, modely pro výrobu forem i pro přímou výrobu [27].



**Obr. 4.18** Vlevo: 3-D model jaderníku v programu ProEngineer. Vpravo: Vyhotovený jaderník z ABS plastu [12].

#### 4.2.1.2. Volba jádrové směsi

Při volbě jádrové směsi bylo nutné se rozhodnout, které vlastnosti jsou pro výrobu odlitků s mřížovou strukturou nejzásadnější. Především se jedná o dostatečnou manipulační pevnost, oteruvzdornost a rozpadavost po tepelné expozici. Při výběru směsí muselo být také přihlédnuto k možnostem laboratoří z hlediska výběru nejvhodnější technologie výroby jader. Byla tedy vybrána pojiva s možností vytvrzování směsi profukováním CO<sub>2</sub>. Na základě těchto požadavků bylo rozhodnuto o použití dvou směsí s organickými pryskyřicemi, CO<sub>2</sub> Resolem speciálně upraveným pro odlévání slitin železa a druhým pro odlévání slitin hliníku, a směsi s vodním sklem, které ale nezaručuje tak dobrou rozpadavost jako pryskyřice.

Směsi pojené organickými pryskyřicemi vykazují vysokou pevnost po vytvrzení (především v ohybu), nízkou teplotu termodestrukce a hlavně výbornou rozpadavost. Dále udílí jádrům vysokou stabilitu (umožňují dostatečnou skladovatelnost) a směsi se snadno regenerují mechanicky a pneumaticky, tedy za sucha. Směsi dále vykazují výbornou tekutost, proto se dají foukat nebo vstřelovat. Celkově mají jádra vysokou pevnost při nízkém obsahu pojiva, což je důležité pro výrobu složitých tenkostěnných tvarů [28].

Jelikož se u vodního skla předpokládala horší rozpadavost, a vzhledem k plánovanému odlévání slitiny hliníku se předpokládalo u resolu pro slitiny železa dodatečné žíhání, proběhla série zkoušek převážně pro jádrovou směs pojenou resolem pro slitiny hliníku.

Cílem měření bylo zjistit ideální množství resolové pryskyřice v jádrové směsi a potřebnou dobu vytvrzování. Zkoušky byly prováděny na normoválečcích s rozměry Ø 50 x 50 mm a hmotnosti navážky 156 g. Zjišťovala se pevnost směsi ve stříhu a náchylnost směsi k otěru s různým časovým odstupem od vytvrzení při různém poměru pryskyřice. Tyto údaje pak sloužily jako výchozí hodnoty pro vyhodnocení vhodnosti jader ke skladování v případě, že by nebylo možné je okamžitě po vyrobení zakládat do forem.

Jako ostřívo byl použit křemenný písek Gruzeň Las 22. Vytvrzování CO<sub>2</sub> při průtoku plynu 7 l/min bylo prováděno při 60 a 90 sekundách. Doba otěru v mlýnu byla stanovena na 2 minuty. Uvedené množství pojiva, hmotnostní procenta, jsou vždy vztažena na 100 g ostřiva.

Tabulka 4.2 udává vždy průměrné naměřené hodnoty ze tří vzorků. Měření pro 2 hm. % pryskyřice na 100 g ostřiva bylo ukončeno po 8 hodinách od vytvrzení z důvodu prokazatelně nižších pevností a příliš vysokému otěru.

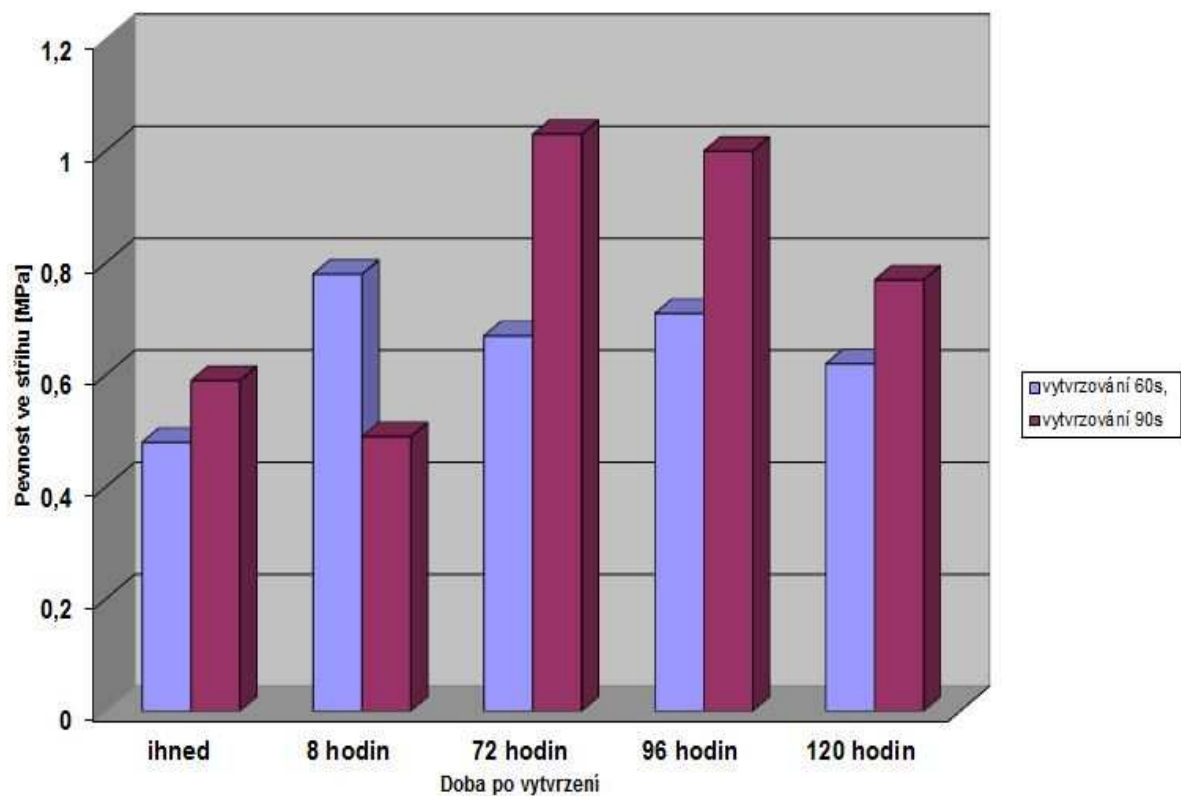
**Tabulka 4.2** Pevnost ve stříhu a otěr směsi v závislosti na době vytvrzení a obsahu pryskyřice

			3 hm. %, 60 s	3 hm. %, 90 s	2 hm. %, 60 s	2 hm. %, 90 s
Doba po vytvrzení	ihned	Stříh [MPa]	0,48	0,59	0,31	0,32
		Otěr %	21,43	19,10	31,98	32,14
	8 hodin	Stříh [MPa]	0,78	0,49	0,48	0,44
		Otěr %	13,22	13,94	21,75	24,89
	72 hodin	Stříh [MPa]	0,67	1,03	-	-
		Otěr %	18,22	11,59	-	-
	96 hodin	Stříh [MPa]	0,72	1,00	-	-
		Otěr %	18,30	11,68	-	-
	120 hodin	Stříh [MPa]	0,62	0,77	-	-
		Otěr %	20,86	12,95	-	-

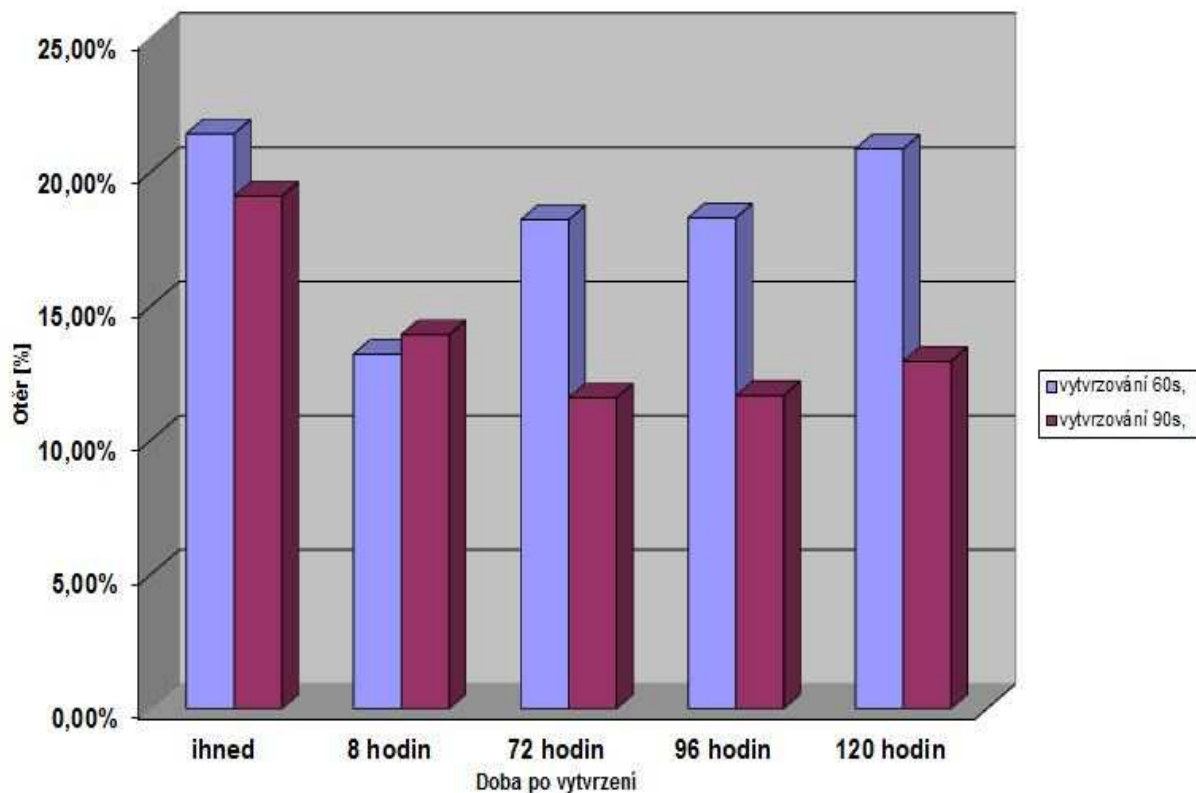
Schématické znázornění pevnosti ve stříhu v závislosti na době po vytvrzení představuje graf 4.1. Hodnota otěru je graficky znázorněná na grafu 4.2. Uvedené hodnoty platí pro směs se 3 hm. % pryskyřice pro slitiny hliníku



*Graf 4.1 Pevnost směsi ve střihu v závislosti na době po vytvrzení.*



*Graf 4.2 Otěr směsi v závislosti na době po vytvrzení.*



Dále se na normoválečcích simulovala rozpadavost po tepelné expozici ve formě pomocí cyklů žíhání v peci. Každý cyklus žíhání trval 2 hodiny. Na vzorcích se 3 hm. % pryskyřice byla provedena zkouška pevnosti ve střihu udávající zbytkové pevnosti směsi (tab. 4.3, 4.4).

Z důvodu nevyhovujících výsledků manipulační pevnosti a otěru směsí se 2 hm. % pryskyřice se u nich upustilo od měření zbytkové pevnosti po vyžíhání.

Schématické znázornění zbytkové pevnosti po vyžíhání představuje graf 4.3.

**Tabulka 4.3** Pevnost směsi ve střihu po tepelné expozici pro dobu vytvrzování 60 sekund.

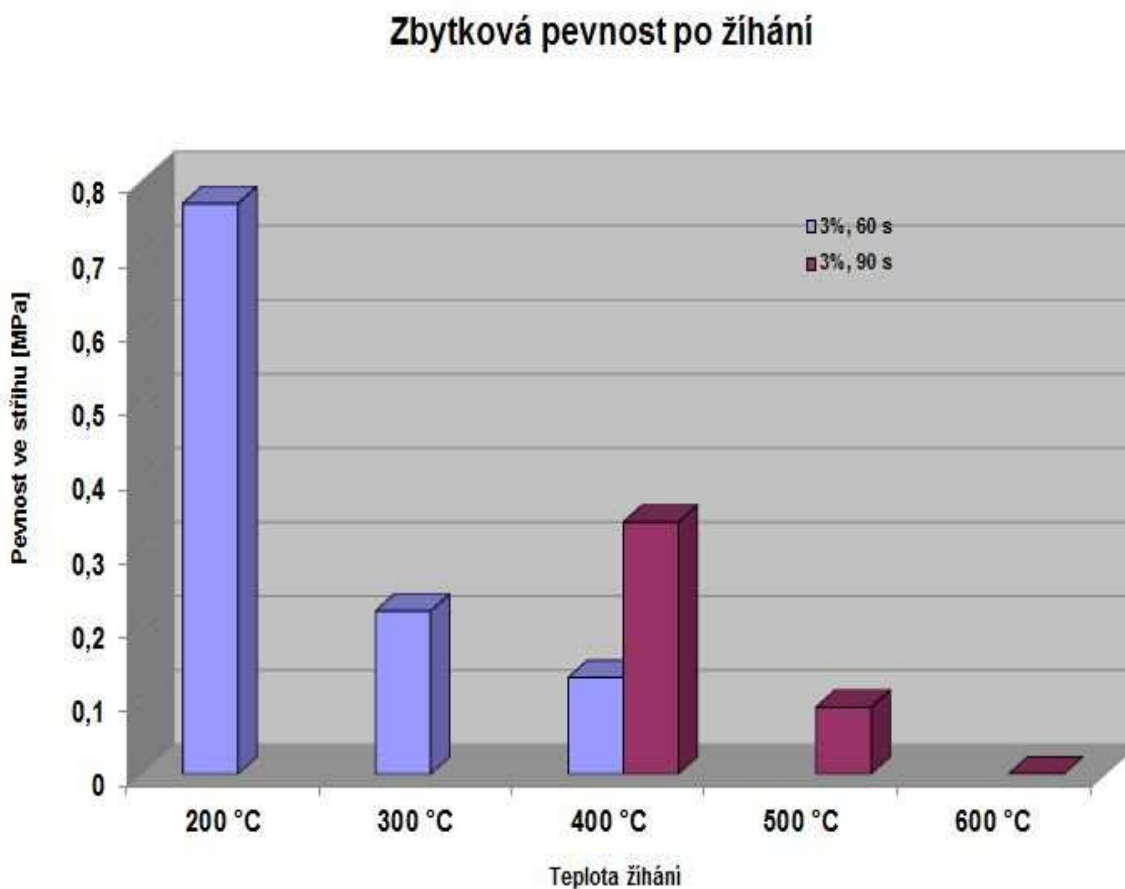
Al Resol: 3 hm. %, doba vytvrzování 60 s.			
Č. vzorku	Pevnost ve střihu po vyžíhání [MPa]		
	200 °C	300 °C	400 °C
1	0,74	0,22	0,105
2	0,8	0,21	0,14
3	- <sup>1</sup>	0,225	0,14
Ø	<b>0,77</b>	<b>0,218</b>	<b>0,127</b>

<sup>1</sup> vzorek se ihned po zapnutí měřicího přístroje rozbil

**Tabulka 4.4** Pevnost směsi ve střihu po tepelné expozici pro dobu vytvrzování 90 sekund.

Al Resol: 3 hm. %, doba vytvrzování 90 s.			
Č. vzorku	Pevnost ve střihu po vyžíhání [MPa]		
	400 °C	500 °C	600 °C
1	0,29	0,05	0
2	0,27	0,11	0
3	0,46	0,11	0
Ø	<b>0,34</b>	<b>0,09</b>	<b>0</b>

**Graf 4.3** Schématické znázornění zbytkové pevnosti po vyžhání směsi se 3 hm. % pryskyřice.



Z naměřených hodnot vyplynulo, že nejvhodnější obsah pryskyřice pro výrobu jader jsou 3 hm. % na 100 g ostřiva při době vytvrzování 90 sekund. Směs si i po delší době od vytvrzení uchovávala dostatečnou manipulační pevnost při nízkém otěru.

Z hlediska zbytkové pevnosti po vyžhání při teplotě 400 °C vykazovala nižší pevnosti, tudíž lepší rozpadavost, směs vytvrzovaná po dobu 60 sekund. Předpokládáme ale, že u vyšších teplot žhání by byly obě směsi (vytvzování 60 a 90 sekund) srovnatelné.

Naopak směs se 2 hm. % pryskyřice na 100 g ostřiva se ukázala jako naprosto nevhodná pro svou nízkou pevnost a příliš vysoký otěr bez závislosti na době vytvrzování.

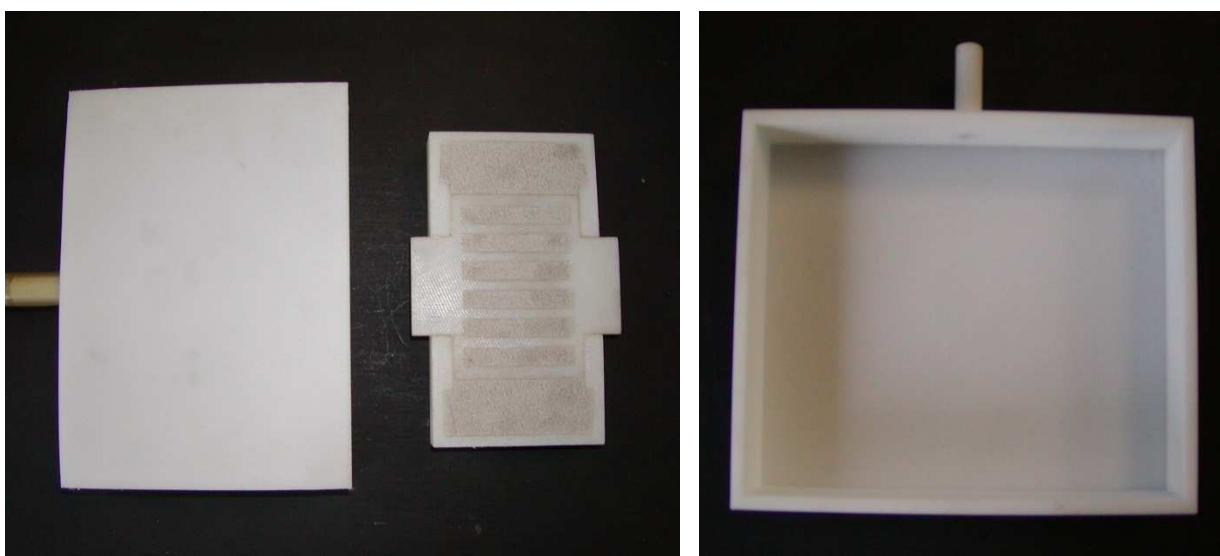
Na základě těchto měření byla směs se 3 hm. % pryskyřice vytvrzovaná po dobu 90 sekund vyhodnocena jako nejvhodnější a bylo s ní nadále pracováno.

### 4.2.1.3. Výroba jader

Přesto, že byla v předchozím pokusu laboratorně vyhodnocena jedna směs pojená resolovou pryskyřicí pro slitiny hliníku jako nejvíce vyhovující, byla vyrobena jádra pro odlitky kromě této i z ostatních směsí, tj. směs s vodním sklem a s resolem pro slitiny železa, aby se prokázala jejich rozpadavost po odlití ve formě.

Z důvodu větších rozměrů a složitějšího tvaru jaderníku byl vytvořen speciální nástavec pro profukování plynným CO<sub>2</sub>, jelikož původní oválný nástavec pro své menší rozměry příliš nevyhovoval. Díky speciálnímu nástavci dochází k vytvrzování jádra rovnoměrně po celé ploše jaderníku bez většího přebytku plynu, a tím k zajištění stejných pevností v různých částech jádra.

Nástavec byl vyhotoven stejně jako jaderník technologií Rapid Prototyping 3D tiskem z ABS plastu (viz kapitola 4.2.1.1). Ukázkou nástavce spolu s vytvrzovaným jádrem v jaderníku představuje obrázek 4.19.



**Obr. 4.19** Vlevo: Speciální nástavec s jaderníkem a vytvrzovaným jádrem. Vpravo: speciální nástavec – pohled zevnitř.

Jako první byla zkoušena směs s vodním sklem o složení: 3,5 hm. % vodního skla na 100 g křemenného písku Gruzeň Las 22. Směs byla po napěchování do jaderníku vytvrzována profukováním CO<sub>2</sub> po dobu 90 sekund pomocí speciálního nástavce. Průtok plynu byl 7 l/min.

Následovala výroba jader ze směsi ze dvou typů organické pryskyřice Resol upravených pro odlévání slitin železa a pro odlévání hliníku. Obsah obou pryskyřic byl 3 hm. % na 100 g křemenného písku Gruzeň Las 22. Vytvrzování opět probíhalo profukováním CO<sub>2</sub> po dobu 90 sekund.

Ukázku hotových jader připravených k formování představuje obrázek 4.20.



*Obr. 4.20 Hotová jádra ze směsi s vodním sklem.*

#### **4.2.1.4. Formování**

Před formováním byla jednotlivá jádra složena na sebe (obr. 4.22 vlevo) do výše budoucího odlitku. Formovalo se do bentonitové směsi do spodního rámu formy. Dutina formy byla vytvořena spolu se známkami pro jádra a s vřelí pro pevnou kůrku odlitku nebo bez ní díky předem připraveným modelům. Modely opět vznikaly pomocí technologie Rapid Prototyping a 3D tisku z ABS plastu. Ukázku modelů pro výrobu pěnových odlitků s pevnou povrchovou kůrou a bez povrchové kůry představuje obrázek 4.21.



**Obr. 4.21** Modely pro vytvoření dutin se známkami pro jádra. Vlevo: Model pro kovovou pěnu bez pevné kůry. Vpravo: Model s vůlí pro vytvoření pevné povrchové kůry.

Do vzniklé dutiny se následně zakládaly jádra (obr. 4.22 vpravo). Takto byly formovány vždy střídavě odlitky bez pevné kůry a s pevnou kůrou.



**Obr. 4.22** Vlevo: Složená jádra. Vpravo: Založená jádra ve formě.

#### 4.2.1.5. Vyhodnocení lití

Cílem odlévání bylo zjistit vhodnost určité jádrové směsi pro další pokusy. Hodnotilo se především náročnost odstranění jader ze ztuhého odlitku, tedy míra rozpadavosti směsi po tepelné expozici. Materiálem pro odlévání byla slitina hliníku AlSi10MgMn. Teplota lití byla 850 °C.

Po odlití bylo zjištěno:

- Směs s vodním sklem - odstranění jádra bylo velmi náročné a vyžadovalo značnou mechanickou sílu, a to i přes snahu o částečné rozrušení vodního skla rozpouštěním ve vodní lázni.
- Resol pro slitiny železa - jádro vykazovalo zhoršenou rozpadavost z důvodu nízké teploty lití nutné pro rozpad pojiva. Bylo nutné odlitky dodatečně vyžít a zbytky jader odstranit tryskáním.
- Resol pro slitiny hliníku - jádro mělo po odlití poměrně dobrou rozpadavost bez použití velké mechanické síly. Pro dokonalé odstranění směsi se jádra dodatečně žíhala.

Po odlití se potvrdilo použití směsi s Resolem upraveným pro slitiny hliníku jako nejvhodnější jádrové směsi. Vodní sklo totiž vykazuje celkově horší rozpadavost než organické pryskyřice. Ne vždy dobrá rozpadavost jader s pryskyřicemi byla pravděpodobně způsobena díky velmi krátké době působení tepla ve formě z důvodu malého objemu odlitku a jeho rychlého ztuhnutí.

Ukázky odlitků s jádry, s pevnou a bez pevné kůrky představují obrázky 4.23, 4.24, a 4.25.





*Obr. 4.23 Odlitky s pevnou kůrou a jádry. Vlevo: Resolová jádra. Vpravo: jádra z vodního skla.*



*Obr. 4.24 Odlitky s pevnou povrchovou kůrou po odstranění jader.*



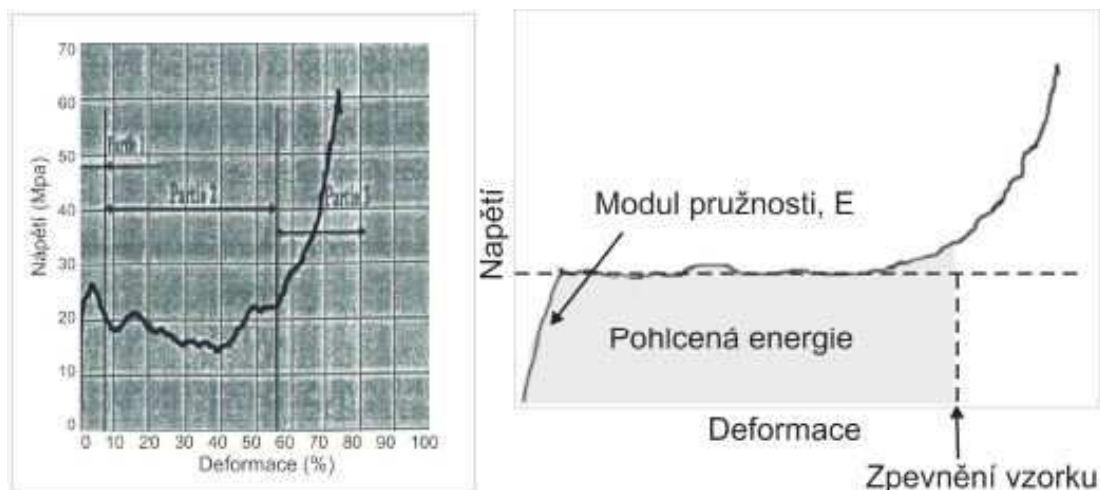


*Obr. 4.25 Detaily mřížových odlitků bez pevné povrchové kůry.*

#### **4.2.1.6. Tlaková zkouška**

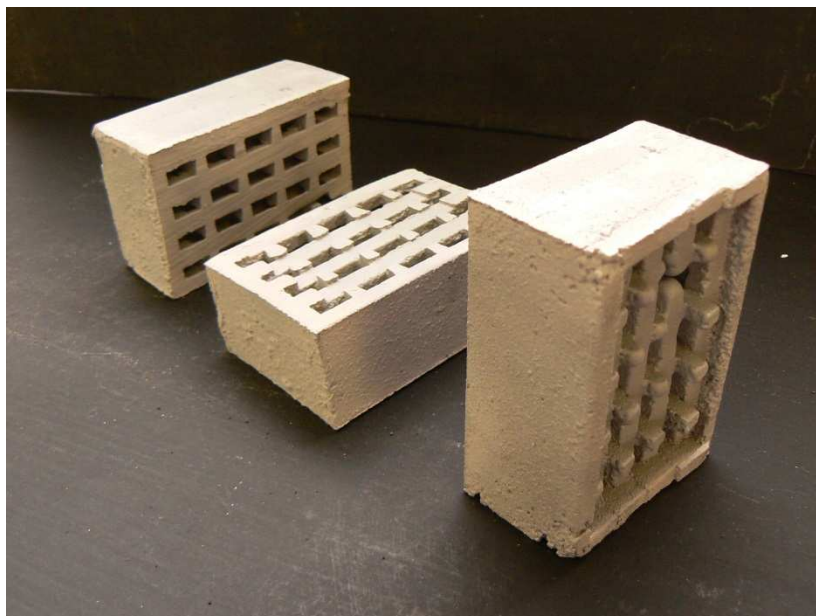
Pro ověření schopnosti mřížových materiálů absorbovat energii, byla provedena zkouška deformace napětím.

Schopnost materiálu absorbovat energii lze stanovit vyhodnocením křivky napětí – deformace. Znázornění takovéto křivky je na obrázku 4.26 vlevo. Na křivce je možné vyznačit tři oblasti: první odpovídá lineární elastické deformaci vzorku, na konci této oblasti se může objevit špička. Druhá oblast znázorňuje deformaci při konstantním napětí a v třetí oblasti probíhá prudké zvýšení napětí z důvodu zpevnění materiálu deformací. Na materiály určené k pohlcování nárazové energie existují následující požadavky: první špačka na grafu má být co nejnižší a oblast č. 2 má být dlouhá a nejlépe bez výkyvů. Energie absorbovaná jednotkovým objemem materiálu odpovídá oblasti pod křivkou napětí – deformace a je označena na obrázku 4.26 vpravo [12].



**Obr. 4.26** Průběh křivky napětí – deformace při tlakové zkoušce [12].

Vzorky pro tlakovou zkoušku byly vyřezány z odlitků s pevnou a bez pevné kůry. Bylo zkoušeno působení tlaku na vzorky v závislosti na velikosti plochy působení, tím pádem se při každém měření měnila strana, na kterou byl vyvíjen tlak. Vzorky byly proto vždy umísťovány do multifunkčního hydraulického zařízení LFV 100 kN v poloze „na hranu, na ležato a na stojato“ (obr. 4.27).



**Obr. 4.27** Poloha vzorků během tlakové zkoušky. Od zadu: poloha „na hranu“, uprostřed „na ležato“, vpředu „na stojato“.

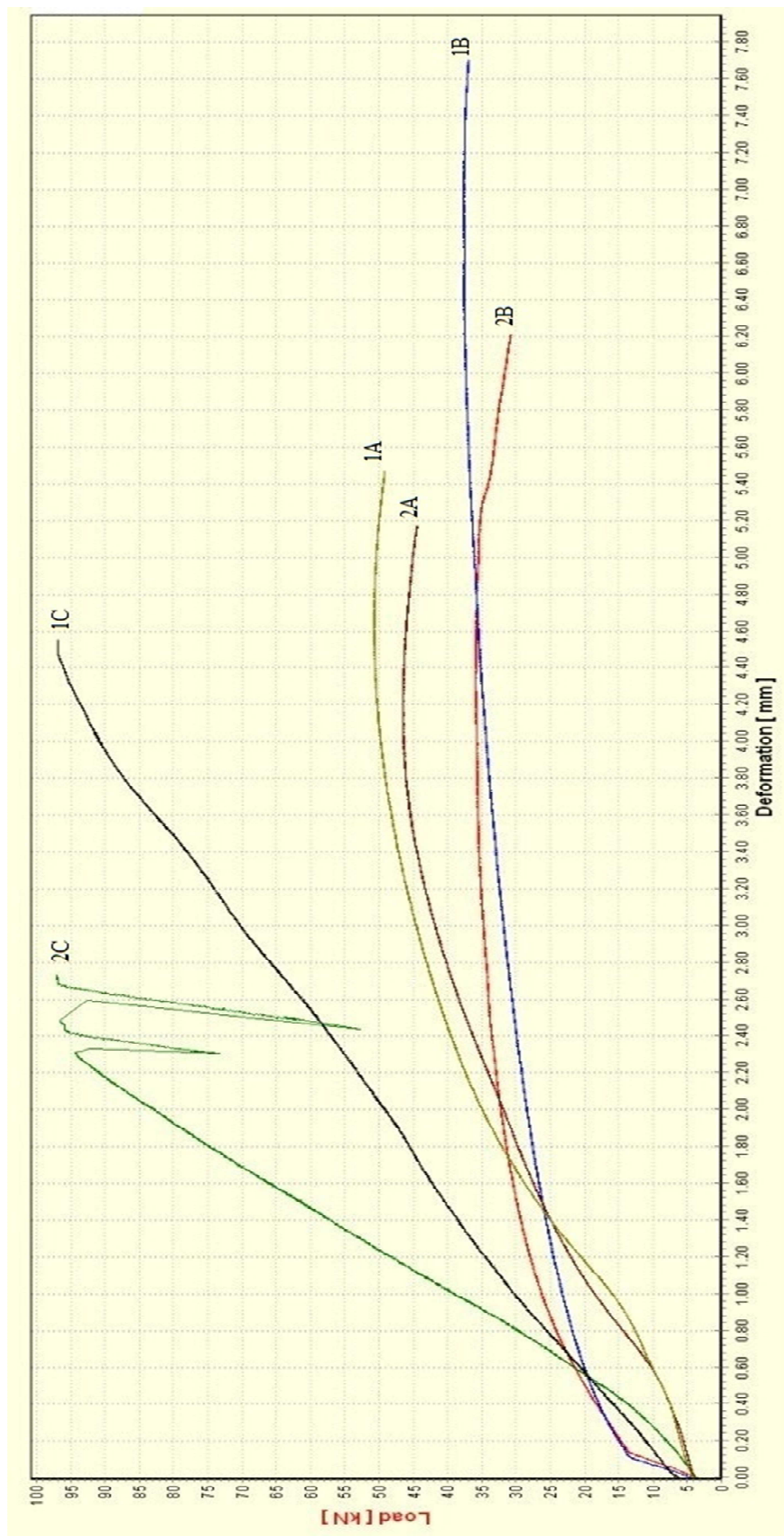
Měření probíhalo při konstantní rychlosti deformace  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Z materiálu bez pevné kůry byly zkoušeny tři vzorky (obr. 4.28), pro materiály s pevnou kůrou bylo ze dvou odlitků vyřezáno celkem šest vzorků (označení 1A-C, 2A-C).

Na vzorcích se zkoumalo deformační chování materiálu při konstantním zatížení, odpovídající tlakové křivce. Tlaková křivka vzorků s pevnou kůrou je patrná z obrázku 4.29.

Při měření vzorků bez pevné kůry došlo vlivem nerovného povrchu k chybám v měření. Deformace byla nerovnoměrná, podle různého zatížení jednotlivých žeber. Výsledky tedy byly neurčité.



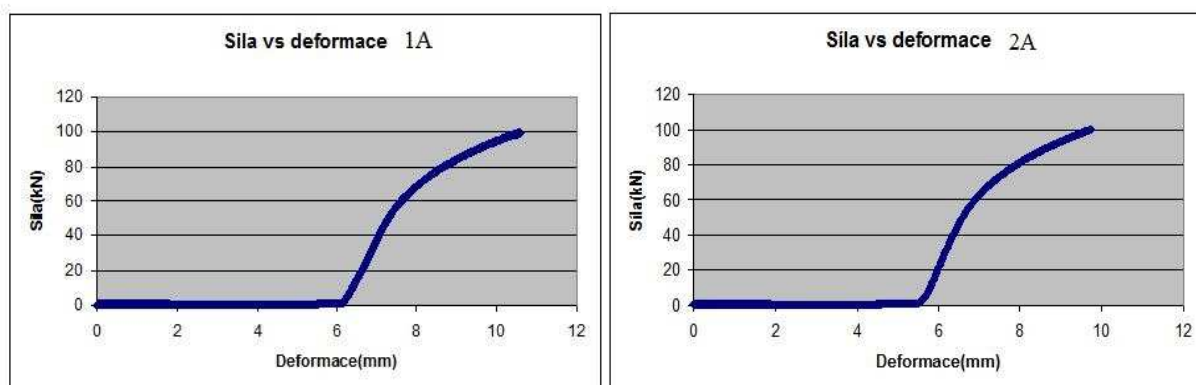
**Obr. 4.28** Probíhající tlaková zkouška na vzorku bez pevné povrchové kůry.



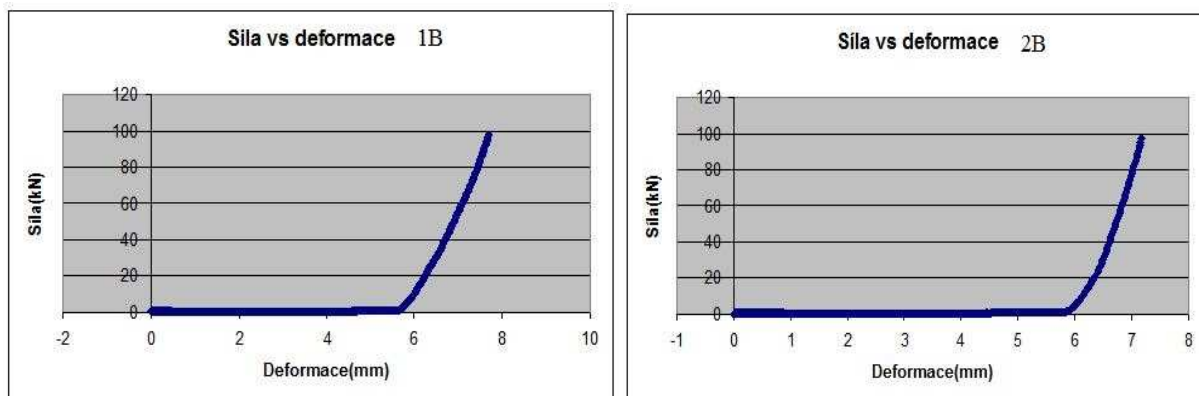
**Obr. 4.29** Tlaková křivka pro vzorky s pevnou kůrou



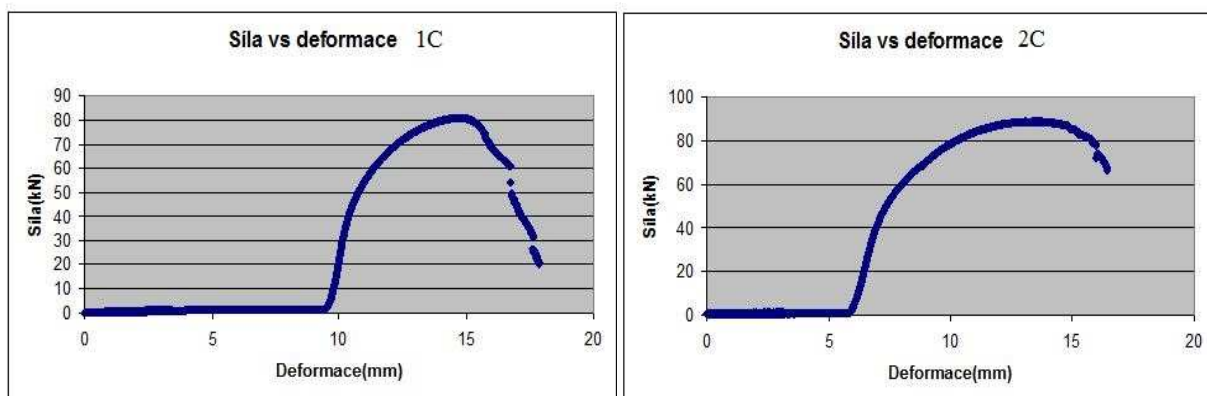
Na obrázcích 4.30 – 4.32 jsou schématicky znázorněny průběhy tlakových zkoušek pro jednotlivé vzorky s pevnou povrchovou vrstvou.



**Obr. 4.30** Schéma tlakové zkoušky: Vlevo: vzorek 1A. Vpravo: vzorek 2A



**Obr. 4.31** Schéma tlakové zkoušky: Vlevo: vzorek 1B. Vpravo: vzorek 2B.



**Obr. 4.32** Schéma tlakové zkoušky: Vlevo: vzorek 1C. Vpravo: vzorek 2C.

Z diagramů vyplývá vykonaná tlaková práce působící na jednotlivé vzorky přepočtená na jejich průřez. Výsledky zkoušky jsou shrnuty v tabulce 4.5.

**Tabulka 4.5** Výsledky tlakové zkoušky

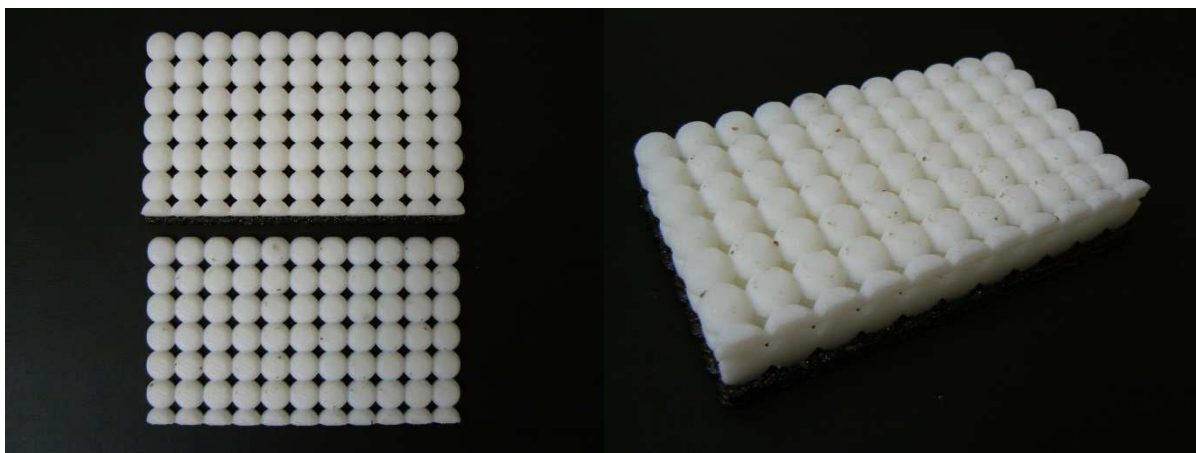
	Vykonaná práce W [J]	Rozměry vzorků [mm]
1A	300,345	30,8 x 76 x 48,5
1B	90,685	75,8 x 49,7 x 29,8
1C	515,365	50,5 x 32 x 75,5
2A	284,512	33,6 x 76 x 47,5
2B	57,320	75,4 x 50,5 x 29
2C	762,092	49,5 x 33,5 x 75

Deformační zkouška byla v tomto případě pouze orientační, jelikož jediné znatelné deformace se dosahovalo u vzorků měřený „na stojato“, tudíž s nejmenší plochou, na kterou působila tlaková síla. U vzorků měřených na větších plochách nedocházelo k větším deformacím, jelikož největší možná zátěžová síla 100 kN se jevila jako malá. Pro tato měření by bylo zapotřebí výkonnějšího měřicího přístroje, než byl k dispozici.

#### **4.2.2. Materiály s pravidelnými kulovitými buňkami**

Jelikož buňky ve tvaru koule jsou z hlediska namáhání výhodnější než buňky hranatého tvaru, byl vyhotoven nový model jaderníku opět metodou 3D tisku a ABS plastu (obr. 4.33). Zhotovení děleného jaderníku pro technologii PUR Coldbox pro vstřelování směsi vzniklo ve spolupráci se Slévárnou a modelárnou Nové Ransko. Tento jaderník byl také ve slévárně vyzkoušen pro odlití materiálu s pravidelnými kulovitými buňkami.

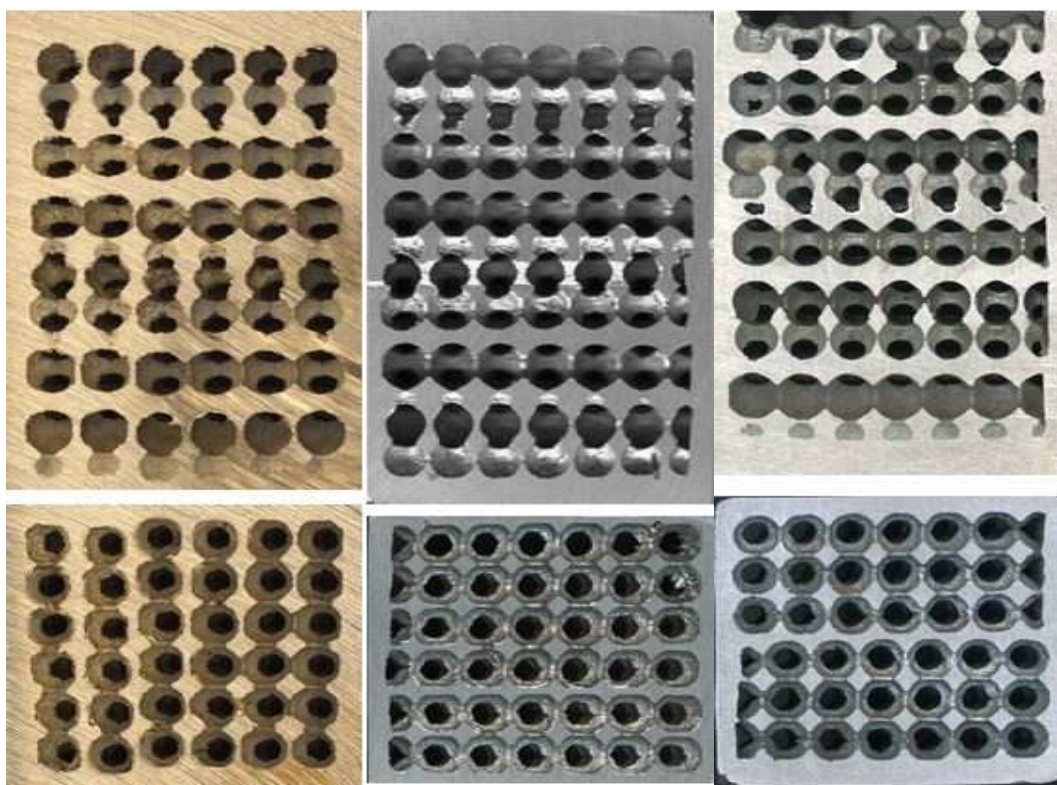
Odlévanými materiály byly cínový bronz, litina s kuličkovým grafitem a hliníková slitina AlSi. Ukázku odlitků představuje obrázek 4.34. Vnitřní uspořádání buněk po rozřezání znázorňuje obrázek 4.35.



**Obr. 4.33** Model pro zhotovení kuličkového jaderníku.



**Obr. 4.34** Odlitky s pravidelnými kulovitými buňkami. Zleva: cínový bronz, AlSi, litina s kuličkovým grafitem.



*Obr. 4.35 Řez odlitky. Zleva: cínový bronz, AlSi, litina s kuličkovým grafitem.*



## Závěr

V teoretické části této diplomové práce byly popsány vlastnosti charakterizující kovové pěny a jejich nejčastější oblasti použití, jako jsou oblasti lehkých konstrukcí, tlumiče nárazů, pohlcovače hluku a vibrací, tak i oblast designu a architektury. Také byly stručně představeny hliníkové pěny z hlediska svých vlastností, jako nejčastější vyráběné pěny.

Dále byly shrnuty slévárenské metody výroby těchto pěn. Bylo popsáno formování, odlévání i používané materiály a poukázáno na výhody i nedostatky těchto metod. Představeno bylo i několik společností, které jsou předními výrobci určitých typů pěn.

V praktické části byly ověřeny vybrané slévárenské metody výroby kovových pěn, které se jeví jako nejvhodnější z hlediska dostupných materiálů a podmínek. Byla takto ověřována metoda výroby kovových filtrů odléváním na spalitelný model, která se po mnoha úskalích ukázala jako velmi nadějná. Dále pak výroba pěn zaléváním prekurzorů vytvořených z poškozených jader spojených pryskyřicemi, které představují pro mnoho sléváren využití odpadových materiálů.

Tyto metody výroby byly ověřovány s cílem nalézt co nejsnadnější možnou cestu k vytvoření pórovitého materiálu s tuhou povrchovou vrstvou. Největší pozornost proto byla věnována výrobě materiálů s pravidelnou mřížovou strukturou, kdy po zhotovení vhodného jádru a testování různých typů jádrových směsí, byla metoda vyhodnocena jako nejvhodnější. Díky výrobě jednotlivých jader je možno odlévat pórovitý materiál nejen bez pevné kůry, ale i s pevnou povrchovou kůrou, která byla naším zájmem. Na takto zhotovených odlitcích byla následně ověřována schopnost pohlcovat větší množství energie při deformaci v závislosti na velikosti plochy působení, které je právě pro tyto materiály charakteristická.

## Seznam použité literatury:

[1] MICHNA, Štefan, et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s.r.o., 2005, s. 642-653. ISBN 80-89041-88-4 642-653.

[2] BANHART, John. *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams* [online]. Progress in Materials Science, 2001, 46, s. 559–632. [cit. 2013-03-30]. URL:<[http://www.uniroma2.it/didattica/tbs2/deposito/Manufacture,\\_characterisation\\_and\\_application\\_of\\_cellular\\_metals\\_and\\_metal\\_foams.pdf](http://www.uniroma2.it/didattica/tbs2/deposito/Manufacture,_characterisation_and_application_of_cellular_metals_and_metal_foams.pdf)>.

[3] BANHART, J – WEAIRE. D. *On the road again: Metal foams find favor* [online]. Physics Today. American Institute of Physics, 2002, s. 37-42. [cit. 2013-03-30]. URL: <<http://www.aluminiumschaum.de/papers/banhart02.pdf>>.

[4] BANHART, John. *Manufacturing Routes for Metallic Foams* [online]. JOM, 2000, 12, 52, s. 22-27. [cit. 2013-03-30]. URL: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>>.

[5] BANHART, John. *Aluminium foams for lighter vehicles* [online]. International Journal of Vehicle Design, 2005, vol. 37, Nos. 2/3, s. 114–125. [cit. 2013-03-30]. URL:<[http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/article/a082\\_banhart2005.pdf](http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/article/a082_banhart2005.pdf)>.

[6] SRIVASTAVA, V. C. – SAHOO, K. L. *Processing, stabilization and applications of metallic foams: Art of science* [online]. Materials Science-Poland, 2007, Vol. 25, No. 3, s. 733–753. [cit. 2010-04-15]. URL: <[http://materialsscience.pwr.wroc.pl/bi/vol25no3/articles/ms\\_18sriv.pdf](http://materialsscience.pwr.wroc.pl/bi/vol25no3/articles/ms_18sriv.pdf)>.

[7] Duocel. ERG, Inc., Oakland, CA. Materials and aerospace corporation. [online]. [cit. 2013-03-30]. URL: <<http://www.ergaerospace.com/index.html>>.

[8] AMJAD, Saira. *Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams* [online]. Cambridge, October 2001. Dizertační práce. University of Cambridge. [cit. 2013-04-05]. URL: <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2000/amjad/a.pdf>>.

- [9] Technical manual for CYMAT: Smart Metal [online]. Cymat Corp., Canada, 2009. [cit. 2013-03-30]. URL: <<http://cymat.com>>.
- [10] EVANS, A.G., et al. *The topological design of multifunctional cellular metals* [online]. s. 1-40. [cit. 2011-04-08]. URL: <<http://www.cellularmaterials.com/papers/benchmark.pdf>>.
- [11] BANHART, John. *Metal Foams - from Fundamental Research to Applications* [online]. Frontiers in the Design of Materials. Universities Press Limited, India. 2007, s. 279-289. [cit. 2013-03-31]. URL: <[http://www.helmholtzberlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b097\\_banhart2007.pdf](http://www.helmholtzberlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b097_banhart2007.pdf)>.
- [12] ZYRYANOVÁ, I. *Lité kovové pěny z Al slitin*. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava, 2011.
- [13] EXXENTIS Ltd, Innovative industrial products [online]. Switzerland, 2012. [cit. 2013-03-31]. URL: <<http://www.exxentis.co.uk>>.
- [14] GAILLARD, Y., et al.: *Les mousses d'aluminium CTIF par voie de fonderie*. Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui, No. 250, 2005, pp. 13 – 24
- [15] BANHART, J. – BAUMEISTER, J. *Production methods for metallic foams* [online]. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1998, vol. 521, s. 121-132. [cit. 2011-04-12]. URL:<[http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b022\\_banhart1998.pdf](http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b022_banhart1998.pdf)>.
- [16] COLETO, J., et al.: *Fabrication de mousses métalliques à cellules ouvertes ou fermées, par les voies de la fonderie, et application de ces mousses*. Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui, No. 238, 2004, pp. 12 – 21
- [17] RUSÍN, Karel. *Disperzní formovací materiály*. Praha: SNTL, 1985, s. 89-93
- [18] *Nauka o materiálu: Přednáška č. 13 – Polymery* [online]. VŠB-TUO, Studijní opory, s. 26-30. [cit. 2013-04-06].

URL: <[http://www.339.vsb.cz/nauka\\_o\\_materialu/Slide13\\_Polymer.pdf](http://www.339.vsb.cz/nauka_o_materialu/Slide13_Polymer.pdf)>.

[19] Ústav makromolekulární chemie AV [online]. ČR, 2008. [cit. 2013-04-06].

URL: <[http://www.imc.cas.cz/cz/umch/zajimavosti\\_z\\_polymerni\\_vedy.htm](http://www.imc.cas.cz/cz/umch/zajimavosti_z_polymerni_vedy.htm)>.

[20] DAIRON, J., et al.: *Mousses métalliques: CTIF innove dans les matériaux cellulaires*.

Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui, No. 295, 2009, pp. 12 – 19

[21] Fonderie Tabourin et Bézile [online]. Vénissieux, Francie, 2012. [cit. 2013-04-30].

URL: <<http://www.tabourin-bezile.fr/>>.

[22] HAYDN, N. - WADLEY, G. *Multifunctional periodic cellular metals* [online]. Phil.

Trans. R. Soc. A, 2006, 364, s. 31–68. Published online 2 December 2005. [cit. 2011-04-20].

URL: <[http://www.virginia.edu/ms/pdf/Wadley\\_fac.pdf](http://www.virginia.edu/ms/pdf/Wadley_fac.pdf)>.

[23] CHOLEWA, M., et al.: *The skeleton castings as a new type of cast lattice structures*

[online]. Journal AMME, 2012, vol. 54, October. [cit. 2013-04-22].

<[http://www.journalamme.org/papers\\_vol54\\_2/54213.pdf](http://www.journalamme.org/papers_vol54_2/54213.pdf)>.

[24] Federal Technology Group. Supporting Industry and U.S. Federal Laboratories.

*Advanced Materials: Cast Lattice Block Structures* [online]. [cit. 2011-04-25].

URL: <[http://www.fedtechgroup.com/advanced\\_materials/lbs/lbs\\_cast.html](http://www.fedtechgroup.com/advanced_materials/lbs/lbs_cast.html)>.

[25] NATHAL, M., V., et al.: *Superalloy lattice block structures* [online].

[cit. 2013-04-22].

URL: <[http://www.tms.org/superalloys/10.7449/2004/Superalloys\\_2004\\_431\\_439.pdf](http://www.tms.org/superalloys/10.7449/2004/Superalloys_2004_431_439.pdf)>.

[26] Product information [online]. INDUTHERM Erwärmungsanlagen GmbH.

[cit. 2013-04-07]. URL: <<http://www.indutherm.de>>.

[27] DNEP. Databáze nabídek, expertů a přístrojů ČVUT [online]. [cit. 2013-04-10]. URL:

<[https://dneп.cvut.cz/zobraz.php?id\\_data=447](https://dneп.cvut.cz/zobraz.php?id_data=447)>.

[28] JELÍNEK, Petr. *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí (Chemie slévárenských poživ)*. Ostrava: OFTIS, 2004, s. 184. ISBN 80-239-2188-6.